



António José Cabral Grade dos Santos

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Determinação experimental das propriedades mecânicas do polietileno

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora : Doutora Zuzana Dimitrovova, Professora Auxiliar da Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Alexandre Baltazar Micaelo, Professor Auxiliar da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida, Professor Associado da Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2017

Determinação experimental das propriedades mecânicas do polietileno

Copyright ©, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Zuzana Dimitrovova, pela atenção, disponibilidade, paciência e pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste trabalho.

Seguidamente agradecer ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico pelas instalações e utensílios colocados à minha disposição.

Ao Luís Araújo pela amizade, força e palavras de incentivo durante estes meses.

À minha irmã pelo apoio incondicional.

Um especial agradecimento à Catarina Jesus por se manter a meu lado durante todo este trabalho.

Por último, à minha família e especialmente ao meu pai pelos sacrifícios realizados ao longo destes anos.

RESUMO

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um estudo experimental com o objetivo de estudar as características mecânicas do polietileno, por forma a se utilizar as suas propriedades em programas de elementos finitos.

Para o efeito foram preparados e ensaiados 12 provetes, sendo 4 de densidade 23kg/m^3 , 4 de 30kg/m^3 e 4 de 40kg/m^3 . Além das diferentes densidades utilizadas, foram realizados ensaios segundo duas direções, L e T, onde se verificou maior e menor rigidez, respectivamente.

Foram realizados ensaios cíclicos, onde as deformações foram registadas por uma máquina universal de marca Instron e por um sistema de correlação digital de imagem de marca VIC proveniente de Correlated Solutions. Os resultados obtidos demonstraram que as deformações não são lineares, não sendo possível realizar este tipo de estudo somente com a utilização de equipamento de ensaio global Instron.

Observou-se que, para os provetes de orientação L, de maior rigidez, a carga aplicada no primeiro ciclo foi superior às cargas aplicadas nos ciclos restantes. Este comportamento deve-se à morfologia interna do material que, depois de solicitado de uma forma cíclica, modifica as suas características internas, diminuindo a sua resistência à força aplicada. Já na direção T, por esta ser uma direção onde os provetes se apresentam mais deformáveis e menos rígidos, verifica-se existir uma maior capacidade de absorver as deformações, restituindo a sua forma inicial ao provete. Desta forma, observa-se que as forças aplicadas nos três ciclos são iguais.

ABSTRACT

The present work consists on the development of an experimental study with the aim of experimental determination of parameters that describe polyethylene mechanical properties, with the objective to be implemented in a finite element program.

For this purpose, 12 specimens were prepared and tested, 4 of which had a density of 23 kg/m³, 4 of 30 kg/m³ and 4 of 40 kg/m³. In addition to the different densities, the tests were realized in two directions, L and T, with higher and lower stiffness, respectively.

Cyclic tests were executed on a universal testing machine with brand name Instron and accompany by digital image correlation system from Correlated Solutions designated as VIC. The results obtained demonstrated that, due to the non-linearity of the deformations obtained, such tests should not be performed only on testing machines.

It was observed that, for the L-specimens of higher rigidity, the load applied in the first cycle is higher than the one applied in the remaining cycles. This behavior is due to the internal morphology of the material that, after a load cycle changes its internal characteristics, decreasing its resistance to applied forces. In the T-direction, because it is a direction in which the test pieces are more deformable and less stiff, it is verified that there is a greater capacity to absorb deformations, and return to their initial form. Therefore the forces applied in the three cycles are equal.

PALAVRAS CHAVE

Polietileno

Rigidez negativa

Deformações longitudinais e transversais

KEY WORDS

Polyethylene

Negative stiffness

Longitudinal and transverse deformations

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

a	distância horizontal de AB
h	distância vertical de AB
w	deslocamento de BB'

Letras maiúsculas latinas

L_0	comprimento inicial
E_1	módulo de Young do material 1
E_2	módulo de Young do material 2
EA	rigidez axial
E_C	módulo de Young de um compósito
E_p	energia potencial
E^*	módulo de Young complexo
E''	módulo de perda
F	força externa
i	número imaginário
L	comprimento das barras deformadas
V_1	volume relativo da fase 1
V_2	volume relativo da fase 2

Letras minúsculas gregas

δ	ângulo de fase de atraso da resposta
η	fator de perda

ε	deformação
ζ	variável adimensional
ϑ	ângulo da figura 2.6

Abreviaturas ou siglas

SIBE	structure with inherent bistable elements
BM	base material
DIC	digital image correlation

ÍNDICE DE MATÉRIAS

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Conteúdo e Organização da Dissertação	2
Capítulo 2 - Estado do Conhecimento.....	3
2.1. Introdução	3
2.2. Estudos que envolvem o Silicone como Material Base.....	3
2.3. Estudos que envolvem o Polietileno como material Base	7
2.3.1. Objetivos do Estudo “Structural optimization and material fitting of a material with inherent bistable elements”	7
2.3.2. Snap-Through.....	8
2.3.3. Trabalho Experimental	12
Capítulo 3 - Programa Experimental.....	21
3.1. Introdução	21
3.2. Descrição e Preparação dos Provetes	21
3.3. Instrumentação dos Ensaios - Instron.....	24
Capítulo 4 - Análise dos Resultados	31
4.1. Introdução	31
4.2. Resumo da Totalidade dos Ensaios.....	31
4.3. Apresentação dos Resultados	32
4.3.1. Apresentação de Resultados para Deformações Transversais segundo a Orientação L.32	
4.3.2. Apresentação dos Resultados para Deformações Longitudinais segundo a Orientação T.....	46
Capítulo 5 - Conclusões	65
5.1. Introdução	65
5.2. Resultados Provenientes do VIC.....	65
5.3. Deformações	66
5.3.1. Deformações segundo a Orientação L.....	66
5.3.2. Deformações segundo a Orientação T.....	67
5.3.3. Considerações Finais.....	67
5.5. Recomendações para Trabalhos Futuros.....	67
Referências Bibliográficas	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Alinhamento das lâminas com as forças de compressão aplicadas [11].....	4
Figura 2.2. – Alinhamento das lâminas perpendicular à direção da força aplicada [11].....	5
Figura 2.3. - Módulo de Young do compósito e seu amortecimento segundo Reuss [11].....	5
Figura 2.4. - Reação carga-deslocamento dos tubos de silicone [11].....	6
Figura 2.5. - Tubos de silicone utilizados nos ensaios experimentais de R. S. Lakes [11].....	7
Figura 2.6. – Sistema de duas barras alusivo ao fenómeno do Snap-Through.....	9
Figura 2.7. – Diagrama do Snap – Through segundo o sistema considerado.....	12
Figura 2.8. – Representação gráfica da energia potencial.....	13
Figura 2.9. – Identificação dos provetes BM e esquema SIBE [15].....	13
Figura 2.10. – Máquina de ensaio electromecânico Zwick/Roell Z050 [15].....	14
Figura 2.11. – Rotura de provetes à tração.....	16
Figura 2.12. – Testes efetuados na direção L.....	17
Figura 2.13. – Testes efetuados na direção T.....	17
Figura 2.14. – a) Posição inicial no Teste SIBE.....	18
Figura 2.14. – b) Início da rigidez negativa.....	18
Figura 2.14. – c) Novo início da rigidez positiva.....	18
Figura 2.14. – d) Início da rotura.....	18
Figura 2.15. – Resumo dos resultados dos testes aplicados ao mesmo provete.....	19
Figura 3.1. – Localização em planta dos provetes na placa de densidade 23 kg/m ³	22
Figura 3.2. – Localização em planta dos provetes da placa de densidade 30 kg/m ³	22
Figura 3.3. – Localização em planta dos provetes da placa de densidade 40kg/m ³	23
Figura 3.4. – Colocação dos acrílicos nas extremidades dos provetes.....	23
Figura 3.5. – Ciclos de cargas aplicados aos provetes.....	24
Figura 3.6. – Esquema da máquina Instron.....	25
Figura 3.7. – INSTRON 5566 Universal Testing Machine.....	26
Figura 3.8. – Câmara STINGRAY F-125.....	26
Figura 3.9. – Fonte luminosa da HEDLER, modelo DX15.....	26
Figura 3.10. – Sistema de medição, recolha e interpretação dos dados dos ensaios.....	27
Figura 3.11. – Deformação longitudinal com 0% de restrição e todas as linhas.....	29

Figura 3.12. – Deformação longitudinal com 15% de restrição e menos 5 linhas.....	29
Figura 3.13. – Deformação transversal do provete 5 com 0% de restrição e todas as linhas.....	29
Figura 3.14. – Deformação transversal do provete 5 com 15% de restrição e menos 5 linhas....	29
Figura 4.1. Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	33
Figura 4.2. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	33
Figura 4.3. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 5% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	34
Figura 4.4. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0, 5 e 10% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	34
Figura 4.5. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0, 5, 10 e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	34
Figura 4.6. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0, 5, 10, 15 e 20% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	34
Figura 4.7. - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	35
Figura 4.8. - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0 e 5% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	35
Figura 4.9. - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0, 5 e 10% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	35
Figura 4.10. - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0, 5, 10 e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	36
Figura 4.11. - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0, 5, 10, 15 e 20% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.....	36
Figura 4.12. - Deformação transversal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	36
Figura 4.13. - Deformação transversal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0% e 5% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	37
Figura 4.14. - Deformação transversal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0%, 5% e 10% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	37
Figura 4.15. - Deformação transversal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0%, 5%, 10% e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	37
Figura 4.16. - Deformação transversal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas	37
Figura 4.17. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	38
Figura 4.18. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	39
Figura 4.19. - Deformação longitudinal e transversal do provete 3 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	39
Figura 4.20. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	40
Figura 4.21. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	40

Figura 4.22. - Deformação longitudinal e transversal do provete 5 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	41
Figura 4.23. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	41
Figura 4.24. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	42
Figura 4.25. - Deformação longitudinal e transversal do provete 8 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	42
Figura 4.26. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	43
Figura 4.27. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	43
Figura 4.28. - Deformação longitudinal e transversal do provete 10 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	44
Figura 4.29. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	44
Figura 4.30. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	45
Figura 4.31. - Deformação longitudinal e transversal do provete 11 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	45
Figura 4.32. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	46
Figura 4.33. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	46
Figura 4.34. - Deformação longitudinal e transversal do provete 2 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	47
Figura 4.35. - Deformação transversal para o provete 2 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	47
Figura 4.36. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	48
Figura 4.37. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	48
Figura 4.38. - Deformação longitudinal e transversal do provete 5 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	49
Figura 4.39. - Deformação transversal do provete 2 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	49
Figura 4.40. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	50
Figura 4.41. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	50
Figura 4.42. - Deformação longitudinal e transversal do provete 4 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	51
Figura 4.43. - Deformação transversal do provete 4 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	51
Figura 4.44. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	52
Figura 4.45. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	52

Figura 4.46. - Deformação longitudinal e transversal do provete 6 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	53
Figura 4.47. - deformação transversal do provete 6 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	53
Figura 4.48. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	54
Figura 4.49. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	54
Figura 4.50. - Deformação longitudinal e transversal do provete 6 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	55
Figura 4.51. - Deformação transversal do provete 6 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	55
Figura 4.52. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	56
Figura 4.53. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	56
Figura 4.54. - Deformação longitudinal e transversal do provete 5 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	57
Figura 4.55. - Deformação transversal do provete 7 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas.....	57
Figura 4.56. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	58
Figura 4.57. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	58
Figura 4.58. - Deformação longitudinal e transversal do provete 7 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	59
Figura 4.59. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	59
Figura 4.60. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	60
Figura 4.61. - Deformação longitudinal e transversal do provete 9 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	60
Figura 4.62. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	61
Figura 4.63. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	61
Figura 4.64. - Deformação longitudinal e transversal do provete 9 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	62
Figura 4.65. - Evolução da força aplicada na duração do ensaio.....	62
Figura 4.66. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil.....	63
Figura 4.67. - Deformação longitudinal e transversal do provete 12 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características dos provetes BM1, BM2 e BM3.....	14
Tabela 2.2 – Especificação dos testes efetuados.....	15
Tabela 2.3 – Resultados do segundo ensaio	15
Tabela 3 – Indicação das dimensões e dos números dos provetes executados para as diferentes densidades.....	21
Tabela 4.1 – Resultados globais dos ensaios na orientação L.....	32
Tabela 4.2 – Resultados globais dos ensaios na orientação T	32
Tabela 5.1. – Dados retirados pelo Instron e VIC das deformações impostas aos provetes	64

Capítulo 1

Introdução

1.1.GENERALIDADES

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento no interesse em adquirir conhecimentos quanto às características mecânicas de novos materiais. Consequentemente, verifica-se um aumento no estímulo do estudo científico da otimização e aplicação desses novos materiais.

Tal acontece devido aos progressos efetuados nas áreas dos materiais e na fabricação destes. Assim, é necessário intensificar a investigação, elaborando estudos em compósitos adequados, em fases cuidadosamente escolhidas, incluindo a fase de rigidez negativa que tem vindo a demonstrar capacidades relevantes em termos de rigidez ou amortecimento de vibrações [1], [2].

Recentes estudos comprovam que, a componente de rigidez negativa pode ser facilmente alcançada usando o material polietileno.

O polietileno é um material de fácil acessibilidade e baixo valor económico, logo, de fácil aquisição, pelo que se tem observado a utilização do mesmo em diversos estudos. Acredita-se que o polietileno, devido às suas propriedades, tenha inúmeros benefícios, ainda desconhecidos. Atualmente este tipo de material é utilizado em múltiplas áreas com diferentes fins, como por exemplo, na embalagem e proteção de produtos, por ser facilmente moldável e ainda por ter a possibilidade de ser colado a quente [3]. Devido às vantagens anteriormente referidas, este material foi utilizado em estudos para formar um material que, através da incorporação de uma estrutura instável, consegue atingir a rigidez negativa ao longo de um intervalo de deslocamentos impostos [4], [5].

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objectivo estudar as propriedades mecânicas do polietileno para posterior utilização num programa de elementos finitos. Para o efeito, foram executados provetes que apresentam a mesma geometria prismática, mas diferentes tamanhos e diferentes densidades, com o intuito de avaliar como estes fatores afetam as suas propriedades.

Os provetes de polietileno foram sujeitos a ensaios cíclicos, de forma a se determinarem os parâmetros que caracterizam a viscoelasticidade deste material perante grandes deformações. Estes dados são raramente fornecidos pelos fabricantes, mas são essenciais numa análise de elementos finitos.

O objetivo será comprovar que, mesmo para ensaios com provetes simples, onde se espera uma distribuição uniforme de tensões e deformações, os ensaios não podem ser conduzidos somente através de uma máquina de ensaio universal, sendo essencial o acompanhamento dos mesmos através de correlação digital de imagens.

Os modelos de Elementos Finitos, que serão parte dos desenvolvimentos futuros, irão servir para realizar a caracterização e optimização de um material que exhibe rigidez negativa num intervalo finito de deslocamentos aplicados.

1.3. CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Em seguida é apresentado o conteúdo e a organização desta dissertação, constituída por cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 é apresentado o estado do conhecimento no que diz respeito aos estudos realizados na área de materiais compósitos que incorporam na sua estrutura uma fase de rigidez negativa.

No Capítulo 3 são enumeradas as etapas realizadas durante o procedimento experimental. É dada a conhecer a descrição dos provetes, assim como, as características dos instrumentos necessários na elaboração dos ensaios e monitorização dos mesmos.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos experimentalmente.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho de investigação, sendo ainda sugeridos trabalhos futuros relacionados com este tema.

Capítulo 2

Estado do Conhecimento

2.1. INTRODUÇÃO

O material polietileno é um dos materiais frequentemente utilizados hoje em dia, devido ao seu baixo custo de produção e à sua versatilidade.

Este tipo de material tem diversas características desejáveis, tais como, resistência à água, resistência química, flutuabilidade e características de amortecimento.

Apesar de se tratar de um material considerado vulgar, identificou-se uma lacuna na caracterização das propriedades mecânicas. Assim, nasceu o interesse e a necessidade de se estudar as suas propriedades, para que com a caracterização completa de todos os parâmetros seja possível definir o comportamento viscoelástico para grandes deformações, fornecendo informação necessária para utilização em programas de elementos finitos.

O polietileno foi recentemente utilizado para reproduzir os efeitos de rigidez negativa e, assim, atingir propriedades extremas, como alternativa a outros materiais já implementados para a realização dos mesmos estudos. Estas propriedades acabam por ser propriedades que ultrapassam os valores de cada uma das fases do compósito.

2.2. ESTUDOS QUE ENVOLVEM O SILICONE COMO MATERIAL BASE

Vários investigadores tentaram analisar a rigidez negativa em materiais compósitos para conseguir alcançar materiais de propriedades extremas. Um grupo de investigação liderado por Roderic Lakes, estuda materiais com estruturas heterogêneas, constituídos por compósitos naturais viscoelásticos, tais como osso, ligamento, tendão e madeira, bem como materiais compósitos sintéticos como biomateriais e sólidos celulares com hierarquia estrutural. De igual forma, existe o interesse no estudo dos materiais naturais e sintéticos, para que se atinjam propriedades físicas de muito maior magnitude que as espectáveis nas teorias padrão.

Desta forma, Roderic Lakes lidera o estudo na transformação de fase dos materiais, por estes apresentarem vantagens nas áreas do amortecimento viscoelástico e de rigidez negativa. Estes materiais, por apresentarem propriedades invertidas, incluindo a relação negativa de Poisson, a rigidez negativa e a expansão térmica negativa, proporcionam avanços benéficos em diversas áreas, tais como, medicina dentária, no que diz respeito à reparação de dentes, na aeronáutica relativamente ao desenvolvimento de amortecedores e até no desenvolvimento de motores de dimensões reduzidas [6].

Em seguida descreve-se um dos estudos realizados pelo grupo de investigação de Roderick Lakes, que consiste na análise de um compósito com uma fase de rigidez negativa, com o objectivo de atingir o amortecimento extremo, ou seja, o maior amortecimento existente em cada uma das fases. Foi comprovado que tal só se consegue atingir admitindo que uma das fases tem rigidez negativa.

Segundo este grupo de investigação, a rigidez negativa pode ser conseguida de variadas formas. O estudo presente na actual secção ilustra essa ideia, tendo estudado o comportamento de tubos flexíveis de silicone, sujeitos a uma pré-compressão, estabilizados numa matriz de cimento de silicone e com borracha dura incorporada nas suas extremidades, com o objetivo de explorar a viscoelasticidade de compósitos com elementos de rigidez negativa. Estes modelos exibem uma relação força-deslocamento não-monotónica e, quando sujeitos a determinados deslocamentos, apresentam um intervalo de valores de rigidez negativa.

A rigidez de um compósito linearmente elástico é limitado pelos limites de Voigt e Reuss.

A fórmula de Voigt, ou do limite superior, assume uma distribuição uniforme da deformação. Este limite é observável em elementos que apresentam uma estrutura laminada, onde se verifica o alinhamento das lâminas com as forças aplicadas, como é possível observar na figura 2.1. Esta fórmula é dada por:

$$E_C = E_1 \times V_1 + E_2 \times V_2 \quad (2.1)$$

em que,

E_1, E_2 correspondem aos módulos de Young dos materiais que constituem o compósito.

V_1, V_2 correspondem aos volumes relativos da fase 1 e da fase 2, ou seja, $V_1 + V_2 = 1$



Figura 2.1 – Alinhamento das lâminas com as forças de compressão aplicadas [11]

A fórmula de Reuss, ou limite inferior, assume uma distribuição uniforme da tensão. Neste limite observa-se que as forças estão orientadas perpendicularmente ao alinhamento da estrutura laminada conforme é apresentado na figura 2.2. A fórmula de Reuss é dada por:

$$\frac{1}{E_C} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} \quad (2.2)$$



Figura 2.2 – Alinhamento das lâminas perpendicular à direção da força aplicada [11]

Analisando os limites de Voigt e de Reuss verifica-se que as vantagens da rigidez negativa só estão presentes na fórmula de Reuss pois é neste caso que se observa a possibilidade de obter valores extremos. Os limites de Voigt e Reuss são igualmente aplicáveis para as propriedades viscoelásticas, permitindo assim atingir o amortecimento extremo. Para tal, é necessário escrever as propriedades do material com valores complexos de forma a facilitar a determinação do módulo de Young, sendo estes determinados da seguinte forma:

$$E^* = E' + i \times E'' = E'(1 + i \times \eta), \text{ com } E' = \text{Re} \times E^* \text{ e } \eta = \tan \delta = \frac{\text{Im}(E^*)}{\text{Re}(E^*)} \quad (2.3)$$

onde a parte imaginária do módulo de Young, E'' é o módulo de perda, η o fator de perda e δ o ângulo de fase de atraso da resposta deslocamento-deformação em relação à ação da força-tensão.

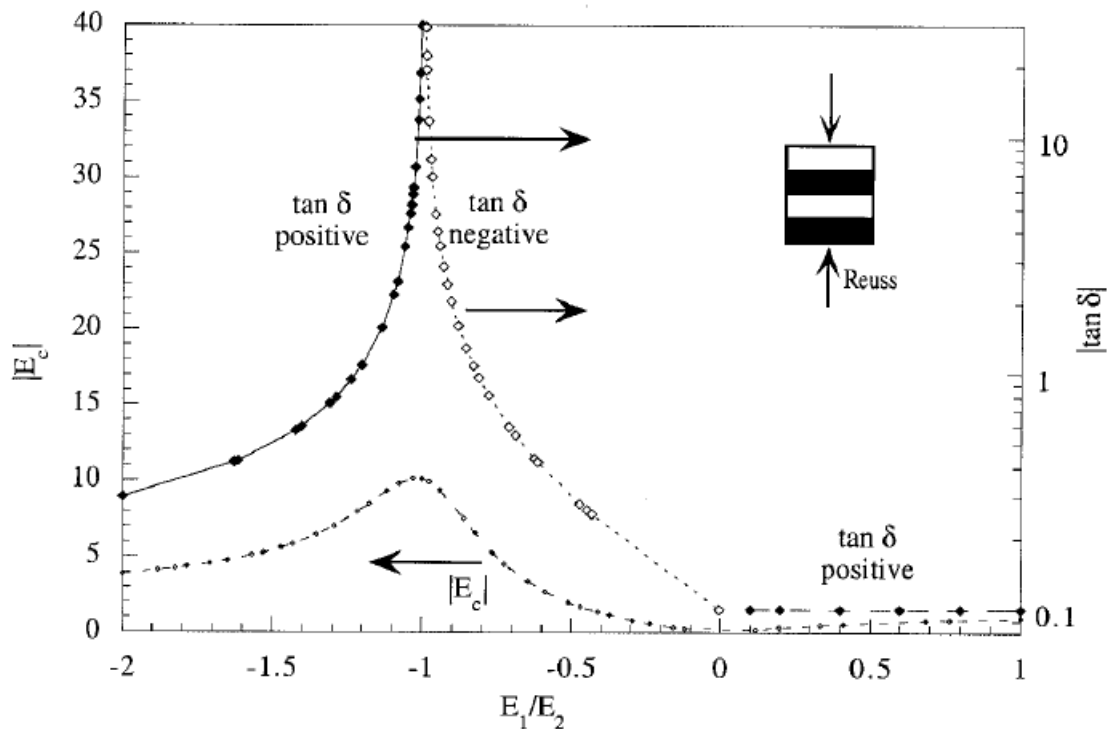


Figura 2.3 - Módulo de Young do compósito e seu amortecimento segundo Reuss [11]

É possível observar na figura 2.3 a representação do valor analítico das propriedades de um compósito na configuração de Reuss usando a fórmula 2.2 para valores complexos consoante a equação 2.3. Assume-se que as duas fases têm o mesmo volume relativo. A fase 2 tem rigidez positiva e fator de perda 0,1. A fase 1 altera o seu módulo de Young, de maneira a que a razão entre os módulos varie entre -2 e 1. O factor de perda é igual ao da segunda fase, no entanto, visto que o módulo de perda tem que ser sempre positivo, E_1 e η_1 apresentam sempre o mesmo sinal. As propriedades do compósito final estão igualmente divididas por E_2 para se obterem valores sem dimensão, designado E_c . A curva 1, representada na figura 2.3, relaciona o valor absoluto de E_c através de uma escala linear apresentada do lado esquerdo do gráfico. As curvas 2 e 3 representam o fator de perda na escala logarítmica, representado no lado direito do gráfico. A curva 2 tem valores positivos e a curva 3 valores negativos, no que se refere aos valores de $\tan \delta$. No entanto, estas curvas são representadas do mesmo lado. Na curva 3, o módulo de Young da fase 1 e o fator de perda são negativos. Nota-se o valor extremo quando os módulos de Young das fases têm o mesmo valor, mas oposto. Na curva 4 observam-se valores positivos e constantes de $\tan \delta$, equivalentes a 0,1, assim como os valores das fases 1 e 2.

Roderic Lakes tentou provar experimentalmente que é possível atingir estes valores extremos, reportados na figura 2.3. Para tal, como já foi mencionado anteriormente, foram ensaiados dois tipos de provetes, ambos tubos de silicone em matriz de silicone de cimento: um tubo na posição reta e indeformada, outro com uma pré-compressão, até se atingir a posição deformada, tomando a forma em “S”, ou seja, já com alguma energia acumulada.

Os tubos ensaiados no estudo da presente secção têm cerca de 40 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro. Nas extremidades dos mesmos foram coladas 2 peças de borracha com 10 mm de comprimento.

Os ensaios laboratoriais foram realizados com um mecanismo hidráulico do tipo MTS 976, que aplica e controla o deslocamento incrementado nos provetes. Neste estudo, foi utilizada uma célula de carga da Sensotec 41-571 com capacidade de 445 N e uma amplitude de 0,127 mm. Tanto a magnitude como a fase de resposta da força foram medidas usando um amplificador Ithaco, type 3961B.

Na figura 2.4 é possível verificar a relação carga-deslocamento dos provetes numa escala adimensional.

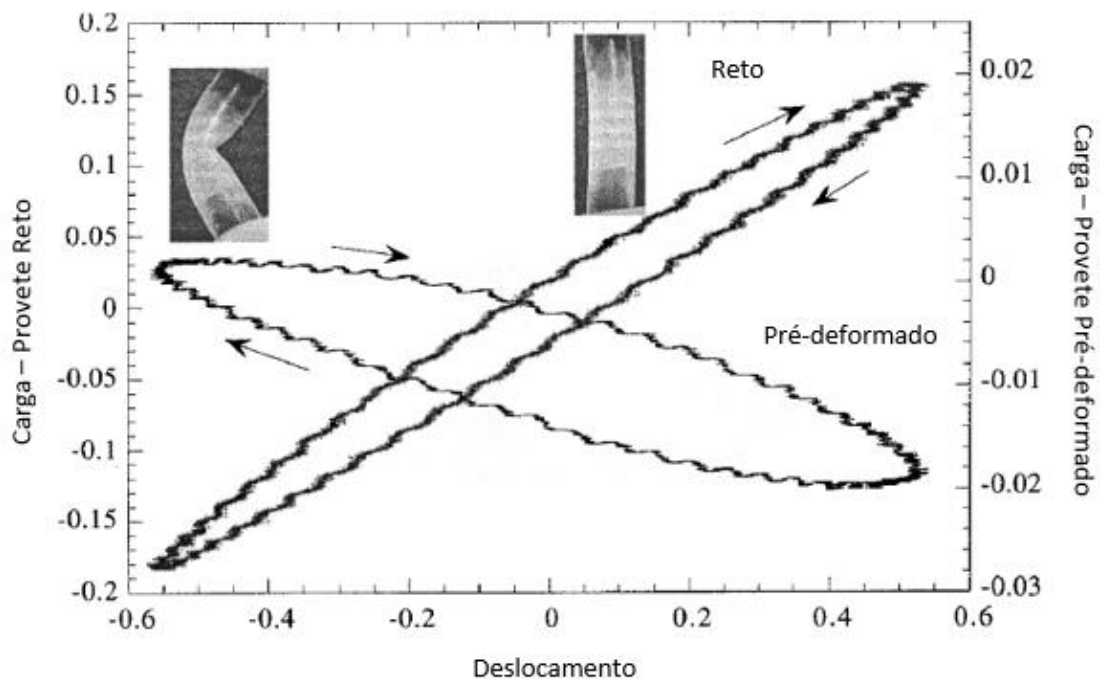


Figura 2.4 - Reação carga-deslocamento dos tubos de silicone [11]

Os tubos foram submetidos a ensaios cíclicos, com excitação sinusoidal de baixa frequência e com controlo dos deslocamentos.

As propriedades viscoelásticas a que Roderic Lakes chegou experimentalmente são apresentadas na figura 2.5 em função do valor de pré-deformação dos tubos deformados.

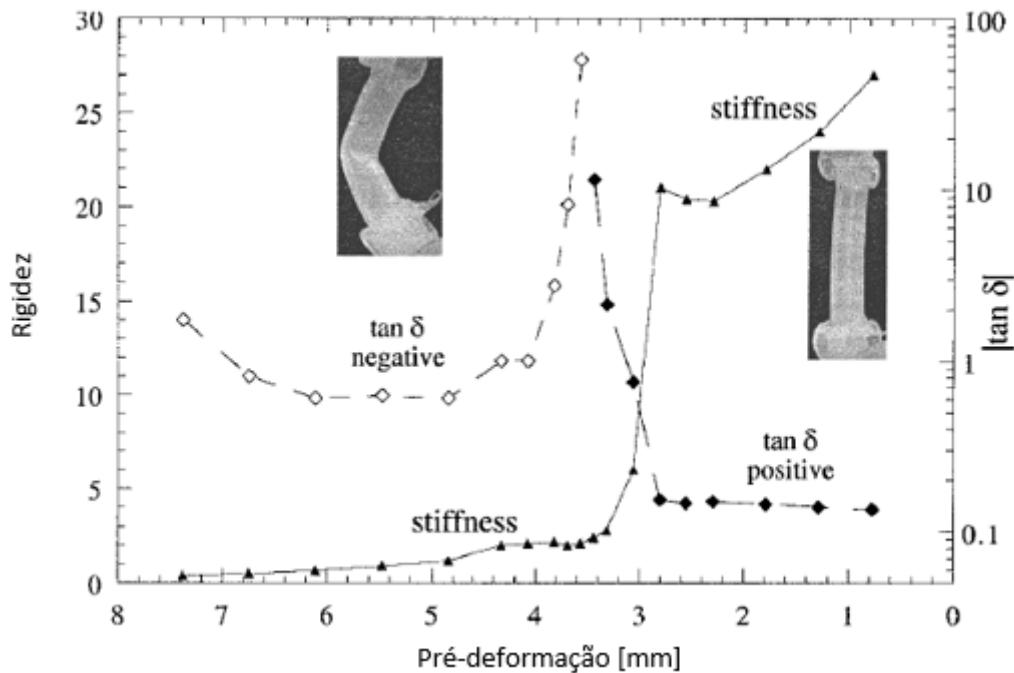


Figura 2.5 - Tubos de silicone utilizados nos ensaios experimentais de R. S. Lakes [11]

Através da análise da figura anterior é possível observar que experimentalmente consegue-se obter o valor de pico de amortecimento, para um certo valor de pré-deformação. Nota-se igualmente que com a diminuição da pré-deformação os valores dos tubos com energia acumulada identificam-se com os valores dos provetes retos, ou seja, o valor do módulo efetivo aumenta bruscamente porque se perde o efeito da rigidez negativa.

Com a análise efetuada no presente estudo, percebe-se que o tubo reto apresenta um comportamento viscoelástico linear com uma rigidez positiva, como indicado pela inclinação positiva no diagrama carga-deformação, e um amortecimento de $\delta = 0,12$. Apesar de a resposta não ser linear para grandes deformações, para pequenas deformações dá origem a um comportamento linear viscoelástico. O mesmo tubo, sujeito à pré-deformação e ensaiado nas mesmas condições, apresenta uma rigidez negativa, como indicado na Figura 2.4.

2.3. ESTUDOS QUE ENVOLVEM COMO MATERIAL BASE POLIETILENO

2.3.1. Objetivos do estudo “Structural optimization and material fitting of a material with inherent bistable elements”

O estudo em análise foi realizado por Zuzana Dimitrovová, com o contributo de diversos autores como, Jan Heczko, Libor Lobovsky, Jan Krystek e Helder C. Rodrigues.

Este estudo consiste na utilização de um material com uma fase de rigidez negativa, conferindo-lhe uma estrutura bifásica através da realização de cortes específicos na sua estrutura (SIBE). A realização destes cortes é efetuada com jatos de água.

Posteriormente, procede-se à análise numérica dos resultados.

Para a realização deste estudo partiu-se de uma espuma de polietileno de baixa densidade, por ser um tipo de plástico correntemente utilizado. Este material é constituído por monómeros de etileno ligados entre si. Quando os monómeros são polimerizados, eles são ligados entre si resultando num termoplástico estável. Assim, com diferentes métodos de polimerização produzem-se diferentes tipos de polietilenos, que são divididos por várias categorias, dependendo da sua densidade e ramificação. O polietileno é um material celular, constituído por células fechadas, sendo a sua estrutura identificada como sendo semi-rígida, não tendo um comportamento nem sólido nem rígido. Espera-se que a introdução de melhorias nos métodos de corte contribua para uma melhoria da sua concepção e otimização estrutural.

Através de estudos realizados por J.Heczko, Z.Dimitrovová e HC.Rodrigues foi possível conferir a estes materiais propriedades de rigidez negativa, numa gama finita de deslocamentos[13], [14], [15] e [16]. A representação típica de um mecanismo de rigidez negativa é formada por duas barras inclinadas, onde ocorre o snap-through.

2.3.2. Snap-Through

O snap - through é um fenómeno de instabilidade conhecido por originar um salto de uma posição de equilíbrio estável para uma nova posição de equilíbrio estável, correspondendo ao mesmo nível de carga, no caso da carga fixa à estrutura; ou para uma nova posição de equilíbrio estável sem carga, no caso da carga livre. Este fenómeno é difícil de analisar numericamente, porque para o mesmo nível de carga correspondem distintas posições de equilíbrio [8], [9].

O efeito snap – through pode ser ilustrado considerando o sistema de duas barras inclinadas do mesmo comprimento, apoiadas em apoios fixos e ligadas por uma rótula, como se encontra ilustrado na figura 2.6. Estas barras apresentam uma rigidez axial EA.

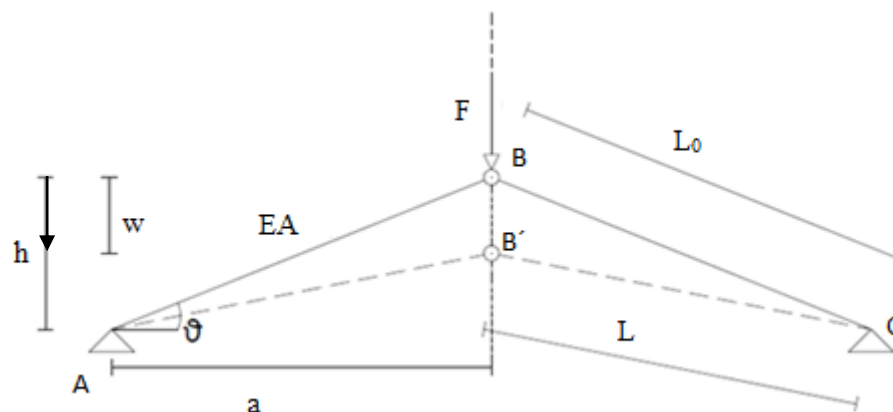


Figura 2.6 – Sistema de duas barras alusivo ao fenómeno de Snap-Through

O comprimento inicial L_0 é dado por:

$$L_0 = \sqrt{a^2 + h^2}, \quad (2.4)$$

A distância horizontal entre os pontos A e B é dada por a , e h representa a distância vertical entre os pontos A e B.

Na figura 2.6 é apresentado, a linha contínua, o sistema na sua posição indeformada. A linha descontínua, é apresentado o sistema na sua posição deformada, onde é aplicada uma força externa F que provoca um deslocamento w da rótula. Assim, o comprimento das barras passa a ser L , que é dado pela seguinte expressão:

$$L = \sqrt{(h - w)^2 + a^2}, \quad (2.5)$$

A deformação das barras é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.6)$$

Para analisar as posições de equilíbrio e da sua qualidade, realizou-se o estudo da energia potencial.

Como é sabido, as reações em A e C não realizam trabalho. A única força que realiza trabalho é a força F .

Tomando em consideração que a deformada da barra é medida a partir do nível zero, a energia potencial após a deformação é dada por:

$$E_p = 2 \times \frac{1}{2} \times EA \times L_0 \times \varepsilon^2 - F \times w \quad (=) \quad E_p = EA \times L_0 \times \varepsilon^2 - F \times w \quad (2.7)$$

Substituindo na fórmula anterior L pela expressão 2.5, resulta:

$$\begin{aligned} E_p &= EA \times L_0 \times \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right)^2 - F \times w \\ E_p &= \frac{EA}{L_0} \times (L - L_0)^2 - F \times w \\ E_p &= \frac{EA}{L_0} \times \left(\sqrt{(h - w)^2 + a^2} - L_0 \right)^2 - F \times w \\ E_p &= \frac{EA}{L_0} \times \left((h - w)^2 + a^2 - 2 \times ((h - w)^2 + a^2)^{-\frac{1}{2}} \times L_0 + L_0^2 \right) - F \times w \quad (2.8) \end{aligned}$$

Em seguida, com o objetivo de se determinar a posição de equilíbrio do sistema, iguala-se a zero a derivada parcial em ordem a w da Energia Potencial Total. Resulta assim:

$$\begin{aligned} \frac{dE_p}{dw} &= 0 \\ \frac{EA}{L_0} \times \left(2 \times (h - w) \times (-1) - 2 \times L_0 \times \frac{1}{2} \times (a^2 + (h - w)^2)^{-\frac{1}{2}} \times 2 \times (h - w) \times (-1) \right) - F &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{EA}{L_0} \times \left(2 \times (w - h) - 2 \times L_0 \times (a^2 + (h - w)^2)^{-\frac{1}{2}} \times (w - h) \right) - F &= 0 \\ \frac{EA}{L_0} \times 2 \times (w - h) \times \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{a^2 + (h - w)^2}} \right) - F &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Considerando a função $G(w) = F$, vem:

$$G(w) = 2 \times \frac{EA}{L_0} \times (w - h) \times \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{a^2 + (h - w)^2}} \right) \quad (2.10)$$

Por forma a se tornar mais ilustrativo, introduzem-se em seguida, variáveis adimensionais,

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{w - h}{h} \\ h - w &= -\zeta \times h \\ w - h &= \zeta \times h \end{aligned} \quad (2.11)$$

Assim, utilizando o parâmetro pré-definido da força adimensional $\varphi = \frac{F}{EA}$, resulta que,

$$\varphi = \frac{2 \times \frac{EA}{L_0} \times (w - h) \times \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{a^2 + (h - w)^2}} \right)}{EA} = \frac{2}{L_0} \times (w - h) \times \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{a^2 + (h - w)^2}} \right)$$

Introduzindo as variáveis adimensionais de 2.11, obtem-se,

$$\varphi = \frac{2}{L_0} \times (\zeta \times h) \times \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{a^2 + (h - w)^2}} \right) \quad (2.12)$$

Considerando que,

$$h = \sin \vartheta \times L_0 \quad (2.13)$$

em que,

$$a = \cos \vartheta \times L_0 \quad (2.14)$$

A expressão 2.12 passa a,

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \frac{2}{\sqrt{(\sin \vartheta \times Lo)^2 + (\cos \vartheta \times Lo)^2}} \times (\zeta \times \sin \vartheta \times Lo) \times \left(1 - \frac{Lo}{\sqrt{(\cos \vartheta \times Lo)^2 + (-\zeta \times \sin \vartheta \times Lo)^2}}\right) \\
 &= \frac{2}{\sqrt{Lo^2 \times (\cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta)}} \times (\zeta \times \sin \vartheta \times Lo) \times \left(1 - \frac{Lo}{\sqrt{Lo^2 \times (\cos^2 \vartheta + (\zeta \times \sin \vartheta)^2)}}\right) \\
 &= 2 \times (\zeta \times \sin \vartheta) \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \vartheta + \zeta^2 \times \sin^2 \vartheta}}\right)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

que representa a relação força-deslocamento na sua forma adimensional.

Ao se obter os zeros da expressão anterior, observa-se que a função em estudo tem três zeros, o que significa que tem três posições de equilíbrio diferentes, onde se verifica o equilíbrio sem existencia de forças aplicadas. Estas considerações podem ser observadas na figura 2.7.

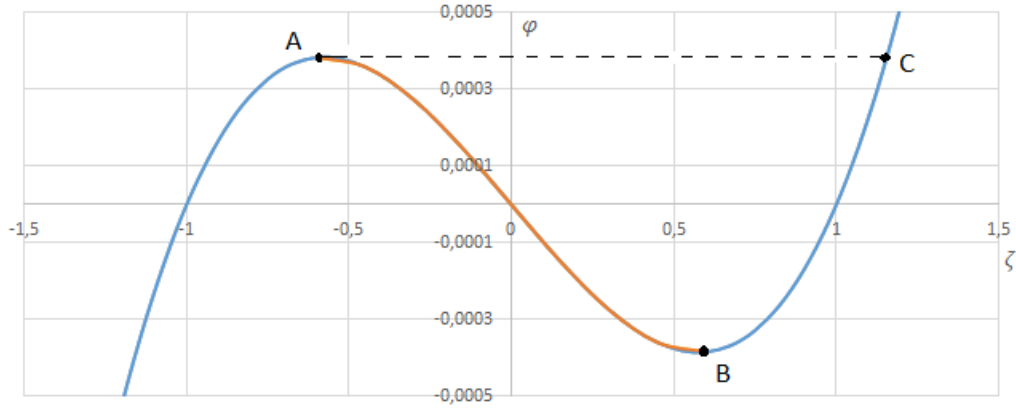


Figura 2.7 – Diagrama do Snap – Through segundo o sistema considerado

Na Figura 2.7, é visível a cor laranja, a região de instabilidade não linear, onde o declive da reta é negativo, tratando-se da região em que o Snap-Through ocorre. É visível que a região de instabilidade não linear vai de um ponto A, onde o declive é nulo, até ao ponto estável B, igualmente de declive nulo.

Verifica-se que no início do fenómeno de Snap-Through o declive do caminho crítico é zero. Quando tal acontece, muitos investigadores encontram problemas porque nestes casos pode existir o salto imediato para o ponto (C) sem se definir o caminho de instabilidade do Snap-Through [11]. Para que tal não aconteça realizam-se os ensaios com o controlo de deslocamentos.

Na análise das condições de equilíbrio de um sistema com um grau de liberdade[12] é possível encontrar um sistema com :

- Equilíbrio Estável,
- Equilíbrio Instável,
- Equilíbrio Indiferente.

Para a identificação do tipo de equilíbrio do sistema em causa, é necessário verificar a segunda derivada da energia potencial. Para uma segunda derivada positiva o equilíbrio é estável e para uma segunda derivada negativa o equilíbrio é instável.

$$\frac{dE}{dW} = 0; \quad \frac{d^2E}{dW^2} > 0 \quad , \text{ para um equilíbrio estável}$$

Assim, podemos verificar na figura 2.8 que as três posições de equilíbrio sem a carga aplicada, -1,0 e 1, do sistema adotado, correspondem ao equilíbrio estável em -1 e 1, e instável em 0, apresentando no gráfico o ponto -1 e 1 uma curva convexa, ou seja, com a segunda derivada positiva e no ponto 0 uma curva concava, ou seja, com a segunda derivada negativa. Tal conclusão é obtida através da representação gráfica da equação (2.15).

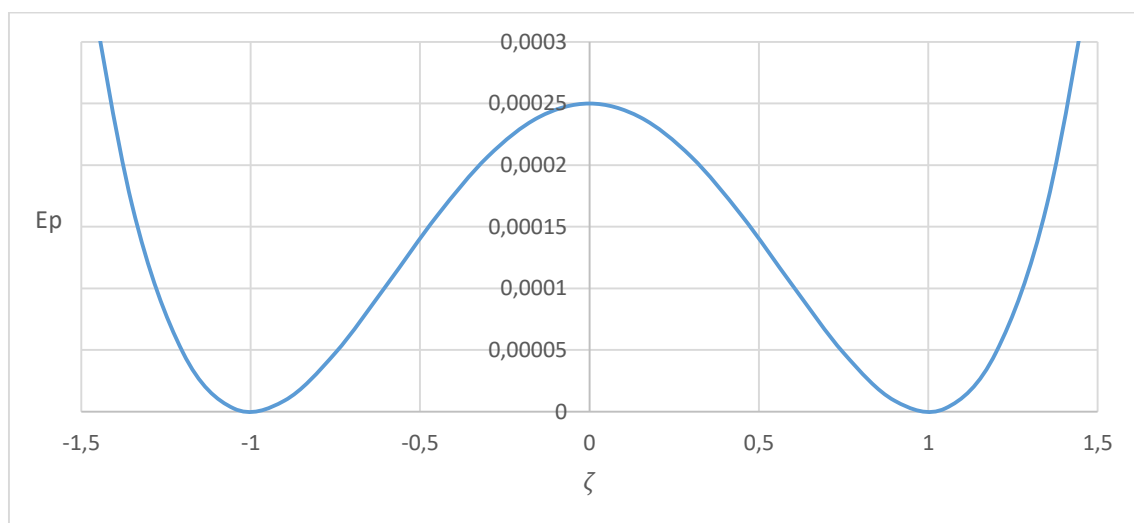


Figura 2.8 – Representação gráfica da energia potencial

2.3.3. Trabalho Experimental

No presente estudo foram realizados ensaios a provetes sem cortes, para se definirem as propriedades mecânicas do material base (BM) e a provetes com cortes com o intuito de se comprovar o comportamento snap-through, e assim a existência da rigidez negativa. Tenciona-se posteriormente reproduzir estes ensaios num programa de elementos finitos.

Os provetes de polietileno foram identificados de duas formas distintas: por direção L, a direção onde as bolhas constituintes dos provetes apresentam um raio de menor dimensão, e por T a direção onde as bolhas apresentam o maior raio. A forma elipsoidal das bolhas irá conferir ao provete uma maior rigidez para a direção L e uma menor para a direção T. Os provetes para serem analisados na sua forma base, são cortados em formato retangular, com o auxílio de uma lâmina quente e, em seguida são colados na sua extremidade peças de acrílico, de modo a proporcionar uma área onde o equipamento se possa fixar. A preparação dos provetes SIBE foi realizada através de cortes na sua estrutura por jatos de água. Estas considerações anteriormente apresentadas podem ser vistas na figura 2.9.

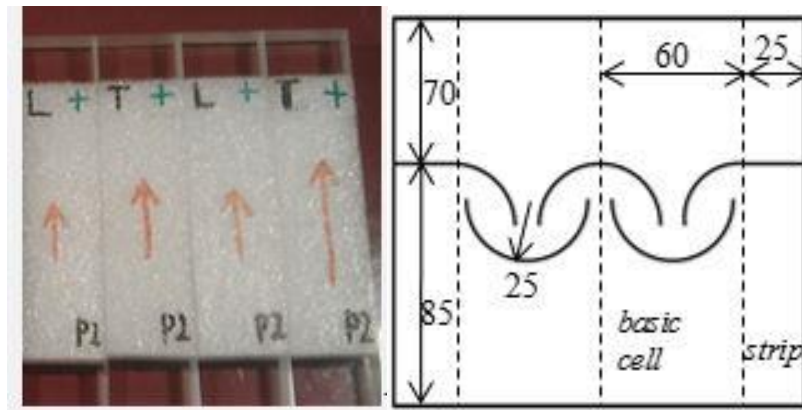


Figura 2.9 – Identificação dos provetes BM e esquema SIBE [15]

Foram realizados testes idênticos no IST e na universidade parceira NTIS-New Technologies for the Information Society, Faculty of Applied Sciences, University of West Bohemia, Plzeň, Czech Republic.

Os testes realizados na universidade parceira foram executados com a utilização de um equipamento electromecânico Zwick/Roell Z050 e um sistema de correlação de imagem digital 3D, Dantec Dynamics Q-400, GenTL/GenICam. Na figura 2.10 é possível observar a máquina de ensaio utilizada na universidade parceira. Os ensaios realizados no laboratório do Instituto Superior Técnico foram executados com o auxílio de uma máquina de teste universal (model 5566, Instron Corporation Canton, USA) com uma célula de carga de 500N, acoplada de um equipamento de correlação de imagem digital, constituída por uma câmara VIC e o respetivo software VIC2D.



Figura 2.10 – Máquina de ensaio electromecânico Zwick/Roell Z050 [15]

O método da correlação digital de imagem (DIC) é um método ótico que utiliza uma análise de correlação digital matemática, para tratar os dados das imagens retiradas durante a realização dos ensaios.

Devido às características refletoras apresentadas pela superfície dos provetes, foi necessário realizar um tratamento de superfície dos mesmos, por forma a conferir-lhes a opacidade necessária à correta análise pelo DIC. Este tratamento consiste na pintura da superfície com uma tinta para acrílicos, de cor branca, e em seguida, a aplicação de uma tinta de cor preta, num tom muito ligeiro, criando-se uns pontos de referência na superfície.

Para os testes BM verificou-se que, apesar de os testes terem sido feitos em diferentes instituições, os resultados obtidos foram semelhantes. Devido aos elevados efeitos viscoelásticos, apenas os testes cíclicos foram usados para o estudo das propriedades do material em análise.

No decorrer do primeiro ensaio foi identificado que, devido ao comprimento elevado, seria impossível chegar aos valores de compressão mais elevados sem a flexão dos mesmos, impedindo a aplicação de uma compressão pura.

De forma a evitar os efeitos de flexão, foram realizados e testados novos provetes de menor comprimento. As dimensões e características dos ensaios são descritas nas tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente.

Tabela 2.1 – Características dos provetes BM1, BM2 e BM3

	Largura [mm]	Espessura [mm]	Comprimento [mm]
BM1L	30,33	20,20	40,40
BM1T	30,29	20,20	39,40
BM2L	29,33	20,20	39,39
BM2T	31,31	20,20	39,38
BM3L	30,31	20,20	40,40
BM3T	31,31	20,20	39,39

Tabela 2.2 - Especificação dos testes efetuados

	8mm/min	16mm/min	32mm/min
$3 \times (4/-4\text{mm}) + 0$	Teste 3	Teste 4	Teste 5
$3 \times (8/-8\text{mm}) + 0$	-	-	Teste 6
$3 \times (8/-8\text{mm}) + 3 \times (12/-12\text{mm}) + 0$	-	-	Teste 7
$3 \times (8/-8\text{mm}) + 3 \times (8/-12\text{mm}) + 0$	Teste 8	Teste 9	-

A realização da segunda gama de testes especificada na tabela 2.2 ocorreu sem a utilização da análise DIC.

Em alguns destes testes não foi possível concluir o ensaio devido à rotura dos provetes, tal como é possível observar na figura 2.11.



Figura 2.11 – Rotura de provetes à tração

Estas roturas ocorrem sobretudo na zona de colagem provete/acrílico.

O sucesso da segunda gama de ensaios são resumidos na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resultados do segundo ensaio

	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9
BM1L	OK	OK	OK	OK			
BM1T	OK	OK	OK		OK		
BM2L	OK	OK	OK	OK			
BM2T	X						
BM3L	OK	OK	OK			OK	
BM3T	OK	OK	OK			OK	OK

Alguns dos resultados da segunda gama de ensaios são apresentados através de gráficos. Para uma melhor percepção, o Teste 3 é identificado a linha verde, o Teste 4, a linha azul, e por último, o Teste 5, a linha preta, como se observa nas figuras 2.12 e 2.13.

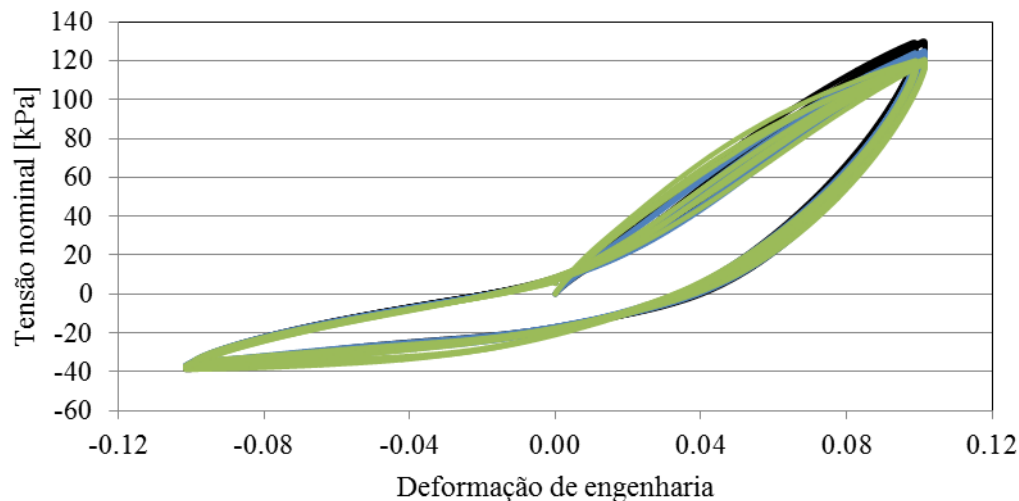


Figura 2.12 – Testes efetuados na direção L

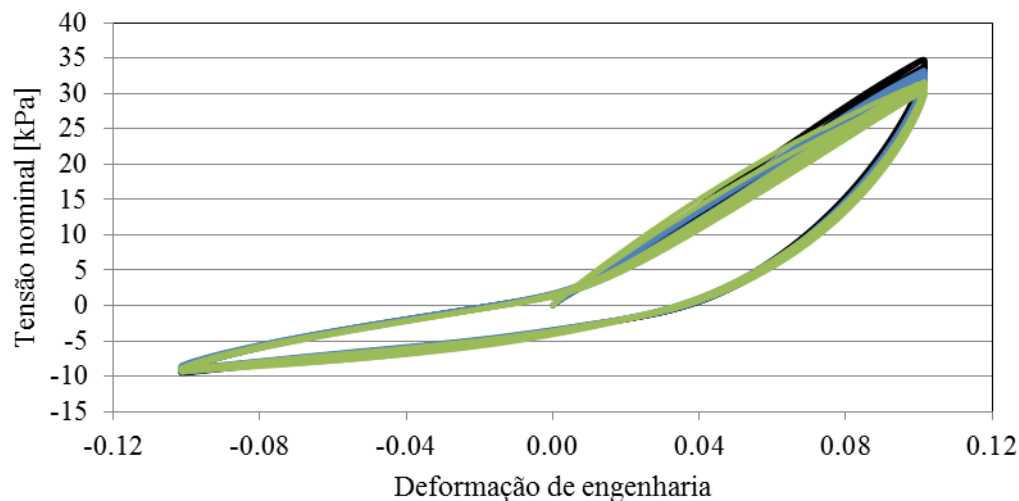


Figura 2.13 – Testes efetuados na direção T

Analisando as figuras 2.12 e 2.13, observa-se que não se regista uma grande diferença causada pela alteração de velocidade dos ensaios, visto que a forma de histereses se manteve praticamente inalterada. Observa-se apenas uma ligeira diferença no primeiro ramo do gráfico tensão-deformação.

Com base nas considerações anteriores e utilizando o módulo dos valores extremos, verifica-se que a relação entre tracção e compressão é de aproximadamente 2, para pequenas deformações (0,03), e 3,4 para deformações maiores (0,1). A partir dos dados fornecidos pelo VIC, conclui-se que a redução da deformação na direção de carregamento chega aos 10% e que os provetes BM submetidos à tracção exibem muito baixa compressibilidade, com um coeficiente de Poisson perto de 0,5. Já na compressão verifica-se que a compressibilidade é muito mais elevada, sendo o coeficiente de Poisson aproximadamente 0,27.

A realização dos testes SIBE foi complementada pela técnica DIC. Este teste pode ser observado através da figura 2.14.

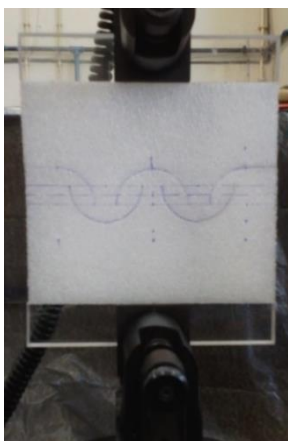


Figura 2.14 – a) Posição inicial no Teste SIBE



Figura 2.14 – b) Início da rigidez negativa

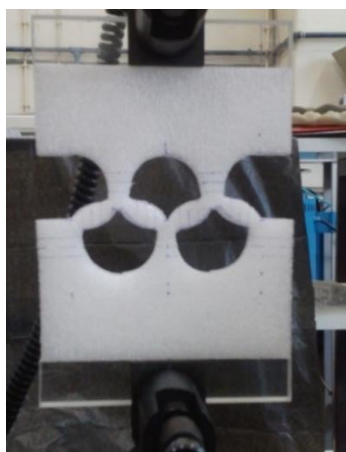


Figura 2.14 – c) Novo início da rigidez positiva



Figura 2.14 – d) Início da rotura

O sumário do resultado das variações força-deslocamento é mostrado na figura 2.15.

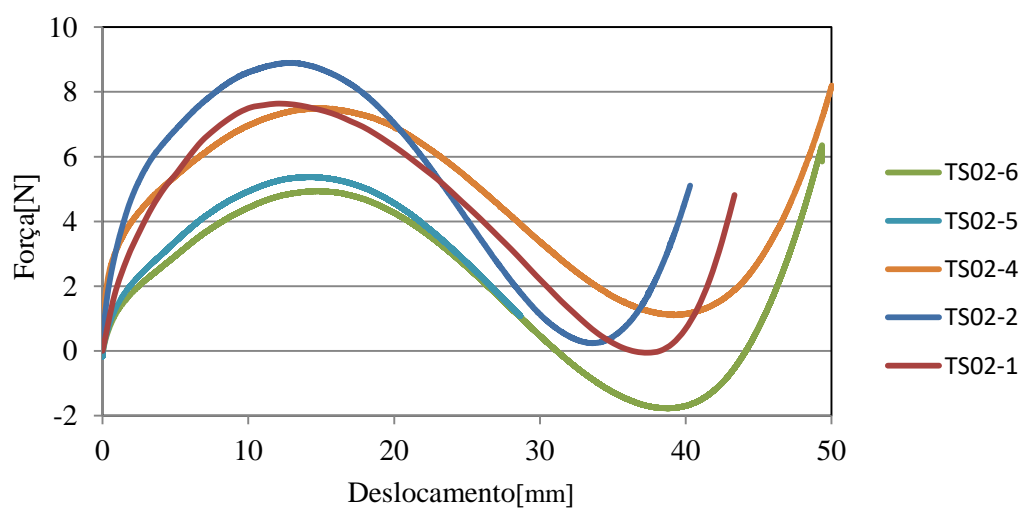


Figura 2.15 – Resumo dos resultados dos testes aplicados ao mesmo provete

Com a realização deste teste verificou-se que podem existir algumas diferenças entre os resultados do mesmo teste aplicado ao mesmo provete. No entanto, a evolução força-deslocamento foi muito semelhante.

Capítulo 3

Programa experimental

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o programa experimental realizado para a determinação das características mecânicas do polietileno. Para esse efeito é descrito o processo de execução dos provetes, assim como as suas características geométricas. De igual forma, é referida a instrumentação necessária para a realização dos ensaios laboratoriais.

Para este estudo foram elaborados 36 provetes, de geometria rectangular em planta. Estes provetes são provenientes de placas de polietileno, de diferentes densidades. Assim, foram cortados das placas de polietileno com densidade de 23 kg/m^3 , 12 provetes, 12 provetes com densidade de 30 kg/m^3 e, por último, 12 provetes com densidade de 40 kg/m^3 .

Na execução dos provetes sentiu-se a necessidade de efetuar os cortes dos mesmos segundo duas direções distintas. Essa necessidade surge devido à constituição microestrutural do polietileno. Esta microestrutura apresenta-se com diversas “bolhas” irregulares entre si na constituição dos provetes. Assim, designa-se, para este material, de direção L a direção onde as bolhas apresentam uma maior curvatura, e de direção T, a direção onde as “bolhas” apresentam um maior achatamento das bolhas e, conseqüentemente, uma menor curvatura.

Os ensaios foram todos realizados no Laboratório do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

3.2. DESCRIÇÃO E PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Como referido na secção 3.1, os provetes ensaiados possuem uma geometria rectangular em planta com 20 mm de espessura. Foi elaborado um conjunto de 12 provetes de cada densidade, dos quais

6 foram cortados segundo a direção L e os outros 6 foram cortados segundo a direção T. Os provetes foram cortados com as seguintes dimensões:

Tabela 3 – Indicação das dimensões e dos números dos provetes executados para as diferentes densidades

	3×4×2 [cm]	3×6×2 [cm]	3×8×2 [cm]	4,5×4×2 [cm]	4,5×6×2 [cm]	4,5×8×2 [cm]	Número total de provetes executados
23kg/m ³	2	2	2	2	2	2	36
30kg/m ³	2	2	2	2	2	2	
40kg/m ³	2	2	2	2	2	2	

Estes provetes foram cortados com o auxílio de um X-ato e uma régua metálica de forma a ser efetuado o corte com a máxima precisão (Figura 3.1, 3.2, e 3.3).

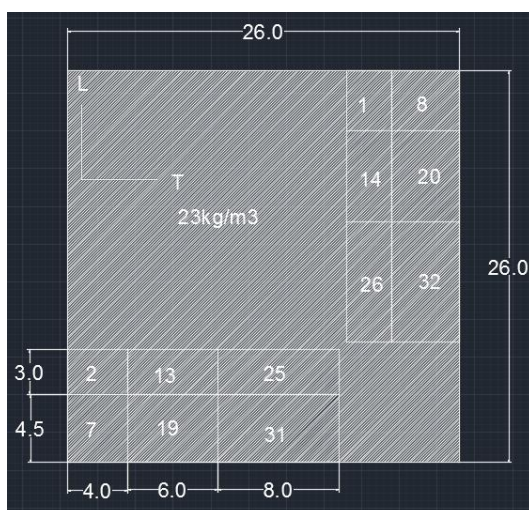


Figura 3.1 – Localização em planta dos provetes na placa de densidade 23 kg/m³

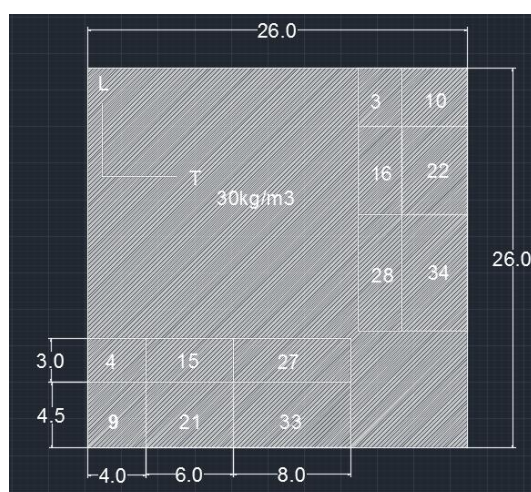


Figura 3.2 – Localização em planta dos provetes da placa de densidade 30 kg/m³

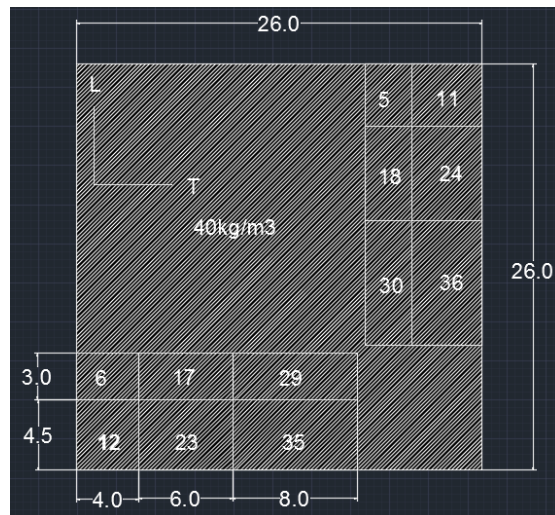


Figura 3.3 – Localização em planta dos provetes da placa de densidade 40kg/m³

Posteriormente, realizou-se a colagem deacrílicos nas extremidades das peças, de forma a garantir a correta fixação ao aparelho de ensaio, sem prejuízo das suas características. Estesacrílicos podem ser observados na figura 3.4. Esta colagem foi efetuada com a utilização de um produto cianoacrilato, mais vulgarmente conhecido por super cola, que consiste num tipo de adesivo que é solúvel em acetona e possui uma resistência mecânica semelhante aoacrílico [12].



Figura 3.4 – Colocação dosacrílicos nas extremidades dos provetes

Em seguida, os provetes foram identificados em função da orientação das bolhas constituintes (L e T), introduzindo-se a designação da orientação nos provetes (L/T). Particularmente em provetes de baixa densidade, onde as bolhas constituintes são de 1-2mm, é possível identificar a orientação das bolhas sem nenhum aparelho adicional.

Devido à superfície dos provetes apresentar uma característica refletora, impregnou-se uma tinta de cor branca, com o objetivo de eliminar o brilho característico da superfície dos provetes de polietileno, conferindo-lhe uma textura opaca, como é possível observar na figura 3.4. Por fim, aplicou-se uma tinta de cor preta, de uma forma suave, com o objetivo de criar pontos de referência para as imagens captadas pela câmara, essenciais para o processamento digital.

3.3. INSTRUMENTAÇÃO DOS ENSAIOS - INSTRON

Nos ensaios experimentais realizados foram controlados deslocamentos impostos, de acordo com a definição dos ciclos introduzidos no software Blue Hill que serve para os registos dos ensaios da máquina universal da marca Instron.

Os provetes foram submetidos a três ciclos de deslocamentos sinusoidais com o mesmo valor positivo e negativo. Foram definidos três tipos de ensaios que diferiram no valor do deslocamento máximo: 2, 4 e 8mm (Figura 3.5.).

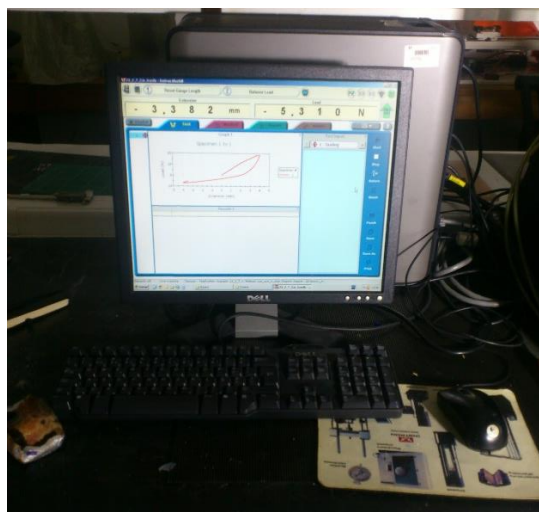


Figura 3.5 – Ciclos de cargas aplicados aos provetes

Para a realização destes ensaios foi utilizada uma máquina INSTRON 5566 Universal Testing Machine, com capacidade de realizar diversos tipos de testes. Com uma simples mudança de configuração esta máquina permite a medição de tração, de flexão e das propriedades de compressão, bem como o coeficiente de atrito dos provetes analisados. Esta máquina é constituída por uma estrutura de suporte, um sistema de computador Instron com software aprovado, uma célula de carga e um controlador.

A estrutura de suporte contém uma base, duas colunas, uma cruzeta, e uma placa no topo. Esta estrutura forma uma “moldura” rígida e fechada, de alta rigidez capaz de reduzir a deflexão da estrutura de suporte quando se aplicam as cargas de ensaio. Cada coluna contém uma “linha” guia que permite a movimentação da cruzeta. A rotação da capa da linha guia permite o movimento ascendente e descendente da cruzeta, enquanto a “linha” guia fornece estabilidade a este mesmo movimento[14]. É possível observar na figura 3.6 o esquema da máquina Instron.

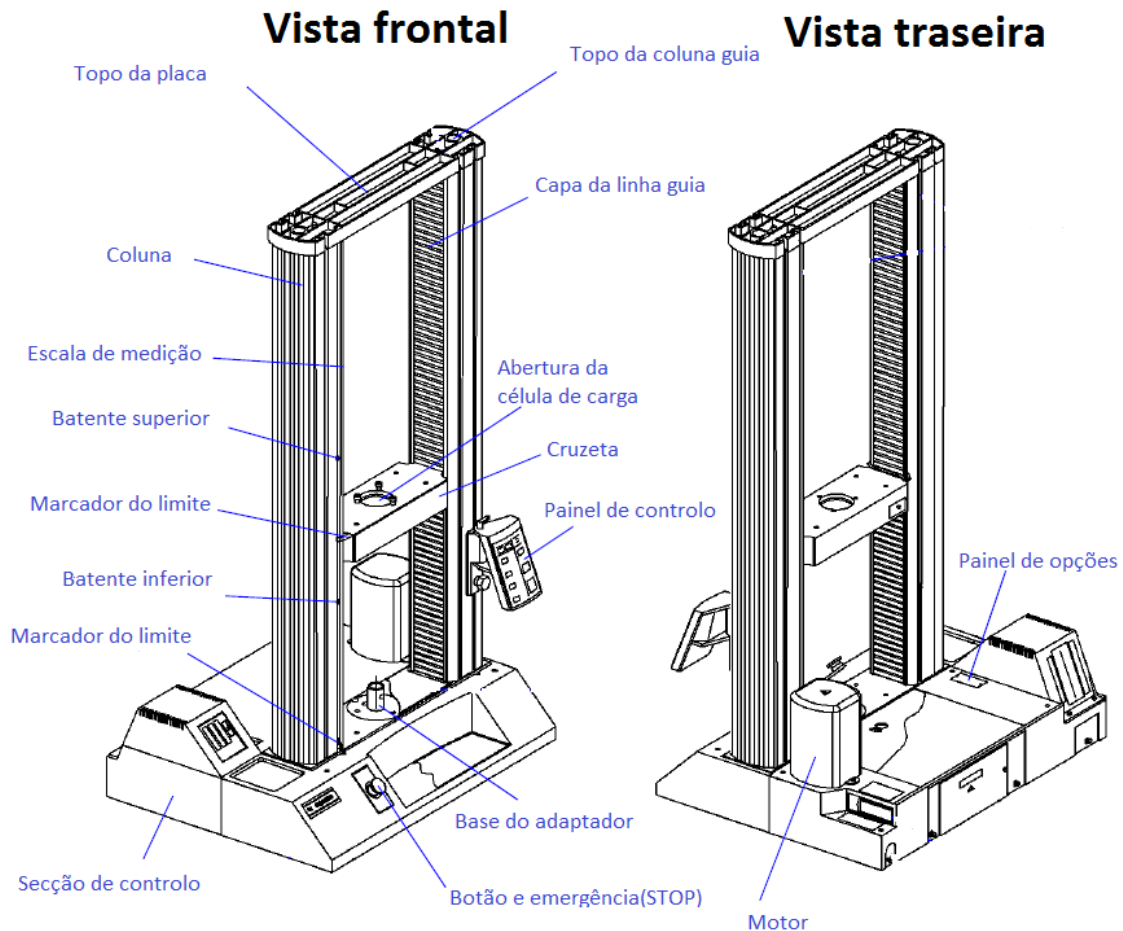


Figura 3.6 – Esquema da máquina Instron

Esta máquina é utilizada para determinar o comportamento dos materiais sob cargas variáveis. Normalmente, os ensaios desenvolvem-se de uma forma repetida para as mesmas amostras, aplicando-se diferentes cargas. Estas cargas podem ser aplicadas na direção axial, em torção ou em flexão.

Para uma correta medição dos deslocamentos dos provetes foi utilizada adicionalmente uma câmara STINGRAY F-125, de alto desempenho, que vem equipada com sensores de alta sensibilidade da Sony EXview HAD CCD ICX445, como é possível observar na figura 3.8[15]. De forma a garantir uma correta leitura dos deslocamentos dos provetes por parte da câmara Stringray F-125, foi colocada uma fonte luminosa da marca HEDLER DX15, que foi concebida para necessidades videodigitais. Esta unidade de luz produz uma luz sem oscilação, com uma lâmpada de halogéneo de 150 W e com baixa produção de calor. Este acessório é apresentado na figura 3.9[16]. Acoplado a este sistema de medição existem dois computadores. O primeiro tem o objetivo de guardar as imagens retiradas pela câmara durante os ensaios aos provetes, e o segundo é reservado ao controlo do ensaio executado na máquina Instron e à recolha das forças registadas na célula de carga do Instron, como é ilustrado na figura 3.10.



Figura 3.7 – INSTRON 5566
Universal Testing Machine



Figura 3.8 – Câmera STINGRAY F-125



Figura 3.9 – Fonte luminosa da HEDLER, modelo DX15

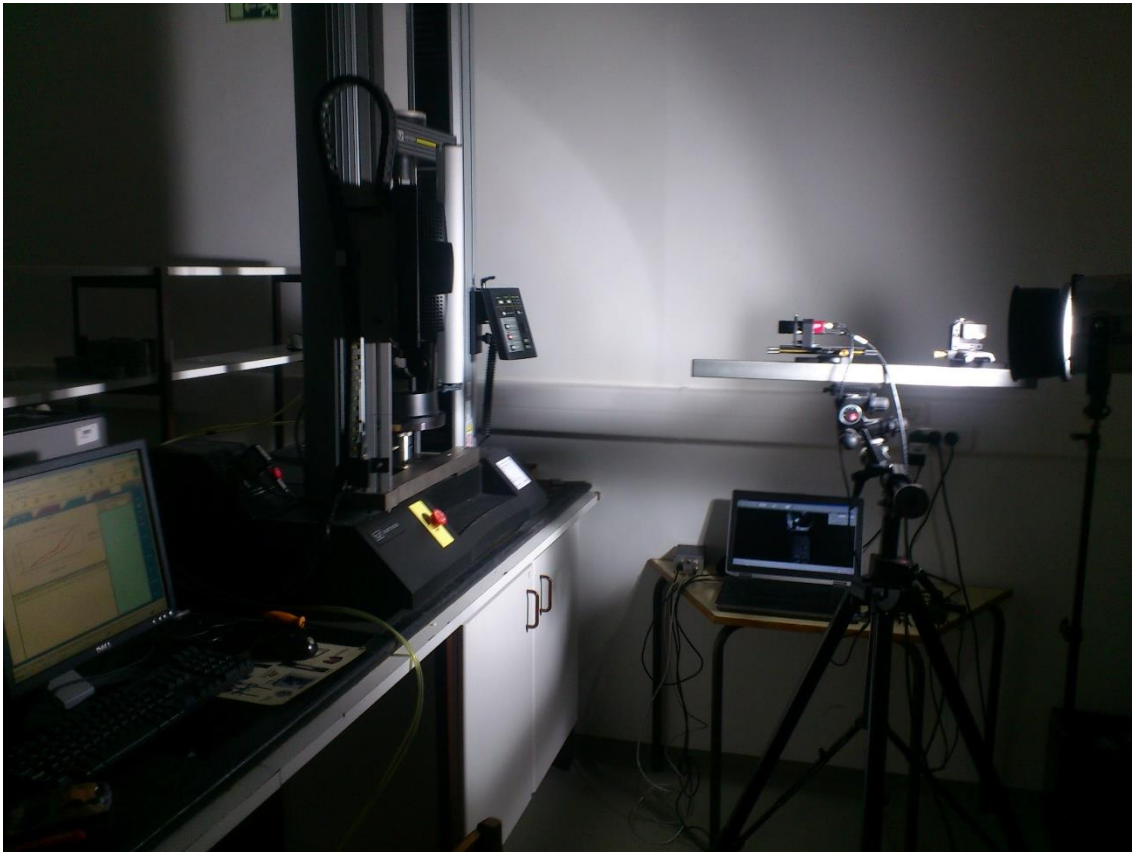


Figura 3.10 – Sistema de medição, recolha e interpretação dos dados dos ensaios

As imagens recolhidas pela câmara são processadas pelo software VIC2D. O output deste software consiste em valores de deslocamentos e deformações para cada ponto pré-definido na superfície do provete e para cada imagem. Estes dados podem ser guardados em matrizes no formato do software Matlab, onde é posteriormente possível programar processamento adicional. Dado a grande oscilação de valores das deformações obtidas diretamente do software VIC2D, foi desenvolvido um programa em Matlab, que permite calcular as deformações homogeneizadas através de declives dos planos que aproximam os deslocamentos usando o método dos mínimos quadrados [17]. Os resultados deste programa são válidos para uma distribuição uniforme de deformações homogeneizadas, tal como durante os ensaios efetuados. Para eliminar alguns erros de processamento digital, é possível eliminar linhas e colunas de matrizes de resultados das extremidades e / ou eliminar os resultados extremos consoante um dado percentil.

Os provetes de polietileno são constituídos por bolhas na sua microestrutura. Consequentemente, as suas extremidades apresentam uma menor resistência mecânica, o que implica o desvio da distribuição uniforme das deformações, e assim a razão porque é necessário eliminar estes resultados do processamento de dados. Em acréscimo, nestas áreas, são coladas as peças de acrílico, o que induz um aumento da modificação das propriedades dos provetes.

O programa desenvolvido no software Matlab para o cálculo das deformações pode ser exemplificado da forma seguinte:

- `[rr,pic]=mean_val_surface('file',nki,nkf,dk,elim,nri,nrf,nci,ncf,res,limv,type,pl)` (3.1)

sendo 'file' o ficheiro onde os dados de processamento digital estão guardados, nki e nkf o número da fotografia a começar e a terminar a análise, dk o passo entre as fotografias, (por exemplo para nki=4, nkf=260 e dk=2, serão analisadas as fotografias 4,6,8.. até 260). O parâmetro elim permite remover uma percentagem de valores recorrendo à definição de percentil. Para isso basta colocar elim=1 na fórmula e em seguida o parâmetro limv permite escolher a percentagem de dados a retirar da amostra. O percentil é uma medida que permite dividir uma amostra ordenada por ordem crescente, em 100 partes. Cada parte apresenta, aproximadamente, o mesmo número de dados. Assim, por exemplo, ao introduzir limv=10, em cada linha ou coluna da matriz de resultados, onde os valores deveriam ser iguais, 10% dos mais baixos e 10% dos mais altos não serão considerados.

Os parâmetros nri e nrf definem o número de linhas horizontais a retirar a partir das extremidades. Para o caso de se utilizar em todas as linhas, nri e nrf são iguais a zero. Para nci e ncf o efeito é idêntico mas para as linhas verticais. res é o nome dos resultados a serem analisados, sendo v_c para deslocamentos verticais e u_c para deslocamentos horizontais. Para o parâmetro type coloca-se 1 para deslocamentos horizontais e 2 para deslocamentos verticais. Este parâmetro indica assim, se é esperado obter os mesmos valores em colunas ou em linhas, e consoante este dado faz-se a eliminação usando o percentil introduzido separadamente aos valores correspondentes a cada coluna ou a cada linha. Por último, pl é o parâmetro que permite reproduzir a análise num conjunto de figuras, que permite posteriormente criar uma animação.

Por forma a se tornar mais intuitivo é apresentada a expressão utilizada na análise da deformação longitudinal do provete 5, com 15% de remoção e menos 5 linhas:

$$[rr,pic]=mean_val_surface('40_5_L_2mm/40_5_L_2-',1,264,1,1,5,5,0,0,'v_c',15,2,1) \quad (3.2)$$

Os resultados obtidos pelo programa representam os coeficientes dos planos que aproximam os deslocamentos, a, b e c, através da equação:

$$a+bx+cy \quad (3.3)$$

estes coeficientes estão disponíveis para cada fotografia processada, o que permite analisar a evolução das deformações ao longo do ensaio. O coeficiente c é o valor respeitante à deformação longitudinal, quando o deslocamento vertical foi processado e b o valor da deformação transversal quando o deslocamento horizontal foi processado, como indicam as fórmulas

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \text{ e } \epsilon_y = \frac{dv}{dx} \quad (3.4)$$

Por forma a clarificar o funcionamento desta fórmula são apresentados em formato de imagem os resultados retirados do provete 5, com todas as linhas nas suas extremidades e 0% de restrições, e 15% de restrições, menos 5 linhas nas suas extremidades.

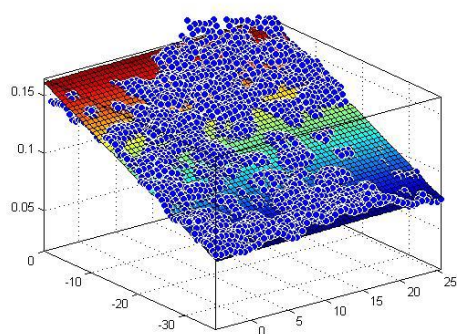


Figura 3.11 – Deslocamento vertical com 0% de restrição e todas as linhas

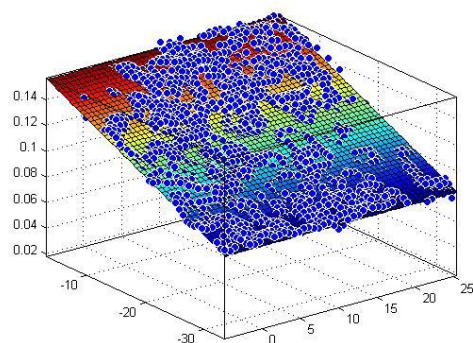


Figura 3.12 – Deslocamento vertical com 15% de restrição e menos 5 linhas

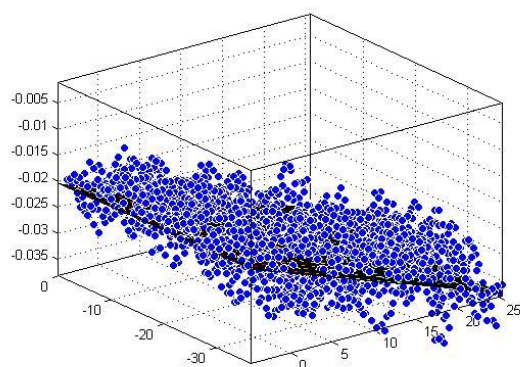


Figura 3.13 – Deslocamento horizontal do provete 5 com 0% de restrição e todas as linhas

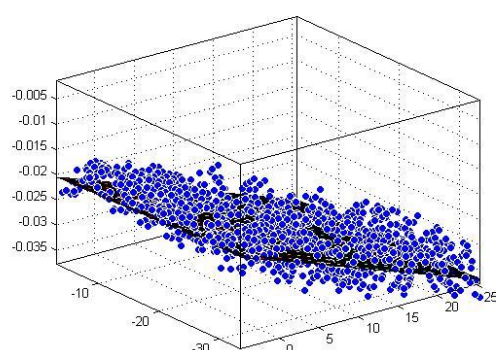


Figura 3.14 – Deslocamento horizontal do provete 5 com 15% de restrição e menos 5 linhas

As figuras anteriormente apresentados representam os deslocamentos verticais e horizontais dos provetes em estudo. O plano representado é determinado pelo método dos mínimos quadrados e a inclinação do mesmo indica-nos o valor da deformação homogeneizada uniforme.

Nas figuras 3.11 e 3.12 são representadas os deslocamentos verticais, sendo visível a oscilação dos valores. A fixação do provete que ocorre na zona azul.

Capítulo 4

Análise dos Resultados

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são analisados e apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais realizados aos provetes, descritos no Capítulo 3. É efetuada uma análise das deformações longitudinais e transversais e das respectivas cargas aplicadas. Nesta análise foram efetuados gráficos que relacionam as tensões com deformações longitudinais e transversais, de forma a serem perceptíveis os ciclos de cargas sofridos pelos mesmos.

Para minorar a percentagem de erro dos valores observados, com auxílio do software de cálculo Matlab, os resultados foram tratados, restringindo a “nuvem” de valores obtidos em 15% do valor de percentil e eliminando 5 linhas das extremidades, dos resultados originais.

4.2. RESUMO DA TOTALIDADE DOS ENSAIOS

Os ensaios 1,2 e 3, são efetuados aos provetes de orientação L e representam a introdução de deslocamentos com intervalos de $[-2,2]$, $[-4,4]$ e $[-8,8]$ milímetros, respectivamente. A análise dos resultados contempla as deformações longitudinais e transversais apresentados pelos provetes. Os ensaios efetuados podem ser observados na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Resultados globais dos ensaios na orientação L

Provete	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
1	OK	X	X
3	OK	EX	X
5	OK	EX	X
8	OK	EX	X
10	OK	EX	X
11	OK	OK	X

Assim, um ensaio efetuado com sucesso é assinalado por um OK, para ensaios excluídos utiliza-se EX e para ensaios não efetuados utiliza-se um X.

Os ensaios 4,5 e 6 foram efetuados aos provetes de orientação T, que correspondem à análise das deformações longitudinais e transversais para intervalos de deslocamentos de [-2,2], [-4,4] e [-8,8] milímetros, respectivamente. Os ensaios efetuados podem ser observados na tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Resultados globais dos ensaios na orientação T

Provete	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
2	OK	OK	EX
4	OK	EX	X
6	OK	OK	EX
7	OK	OK	X
9	OK	OK	X
12	OK	EX	X

4.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para os ensaios cíclicos efetuados aos provetes em estudo, espera-se que, para um ensaio sem a ocorrência de anomalias no seu decorrer, a curva de histerese se apresente bem definida e que a mesma não apresente variação nos seus valores de ciclo para ciclo.

4.3.1. Apresentação de resultados para deformações transversais segundo a orientação L

O ensaio 1 do provete 1 foi efetuado segundo a direção L que apresenta maior rigidez.

A figura 4.1 indica a duração e a variação da força necessária a aplicar para os provetes apresentarem os deslocamentos anteriormente referidos.

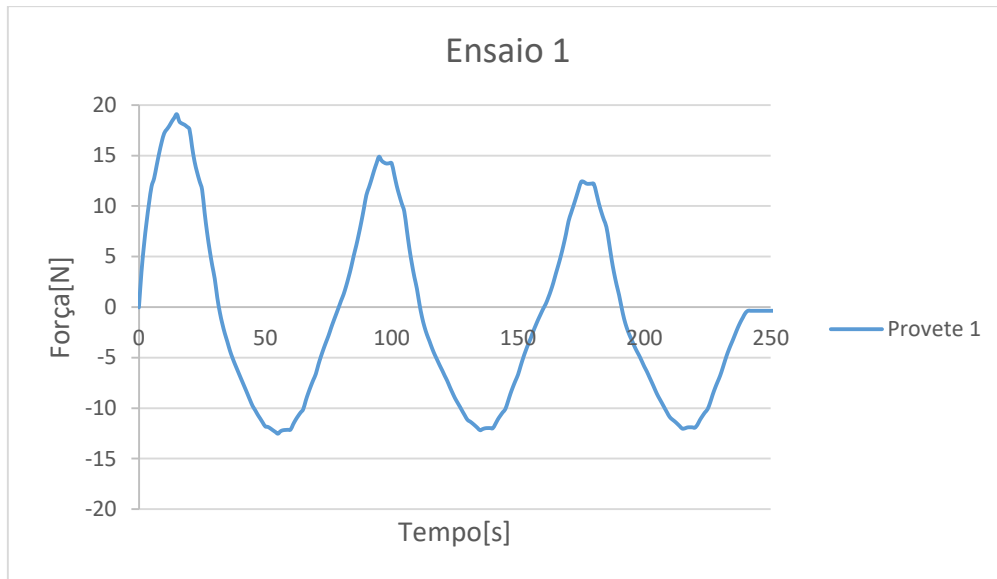


Figura 4.1 Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Como é possível verificar na figura anterior, identifica-se uma diminuição da força aplicada no provete 1 no decorrer dos três ciclos de ensaio na fase de tração, confirmando a existência de um princípio de descolamento entre o acrílico e o provete.

A figura 4.2 apresenta-nos a evolução das deformações com as tensões no provete 1.

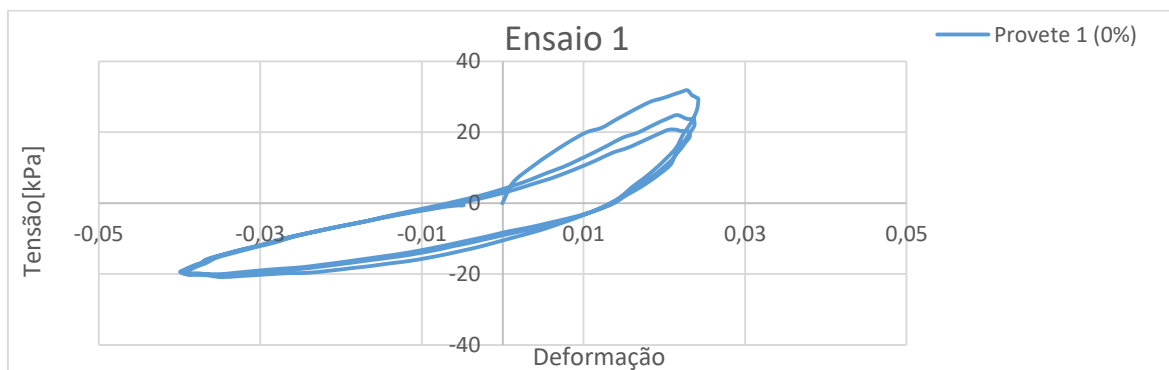


Figura 4.2. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

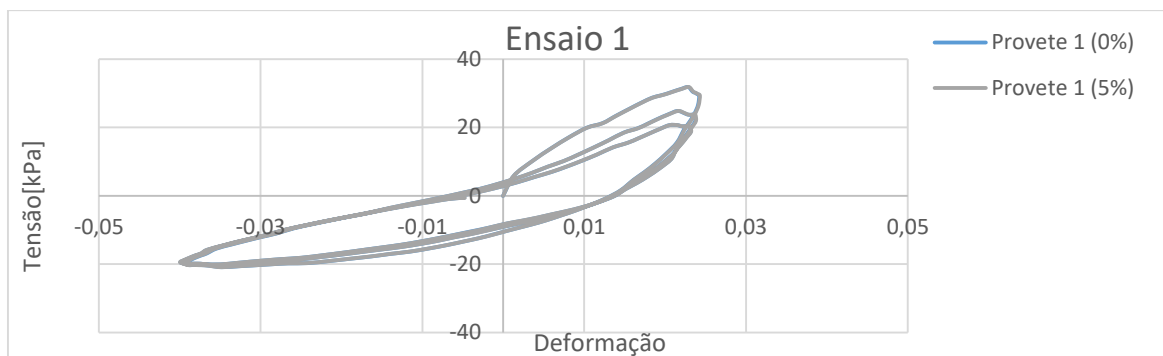


Figura 4.3. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 5% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

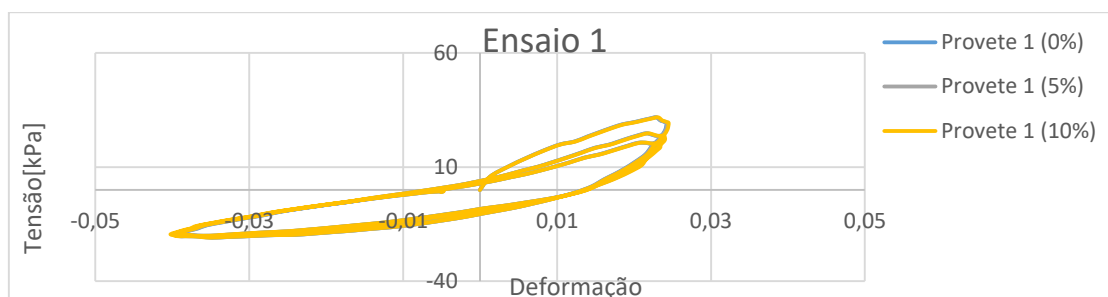


Figura 4.4. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0, 5 e 10% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

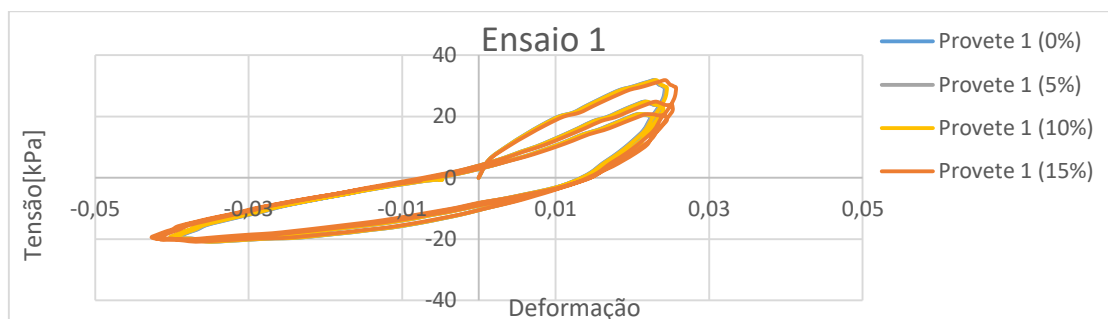


Figura 4.5. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0, 5, 10 e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

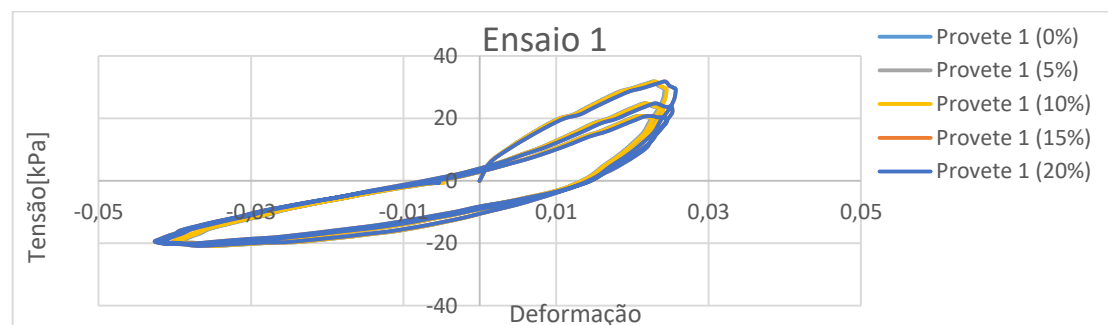


Figura 4.6. - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0, 5, 10, 15 e 20% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

Segundo as figuras 4.3-4.6 é possível identificar que no primeiro, segundo e terceiro ciclos do provete 1, a histerese regista um comportamento não constante, confirmando o início da descolagem, como já referido juntamente da figura 4.1. Este comportamento é claro quando o provete está sujeito à tração, onde se verificam os valores positivos da tensão e da deformação. Quanto à compressão, o efeito da descolagem não se nota.

Em seguida é apresentada a evolução das deformações longitudinais no provete 1. Para uma melhor percepção da variação da deformação dos provetes foram comparados os valores do deslocamento registado pelo Instron e pelo VIC.

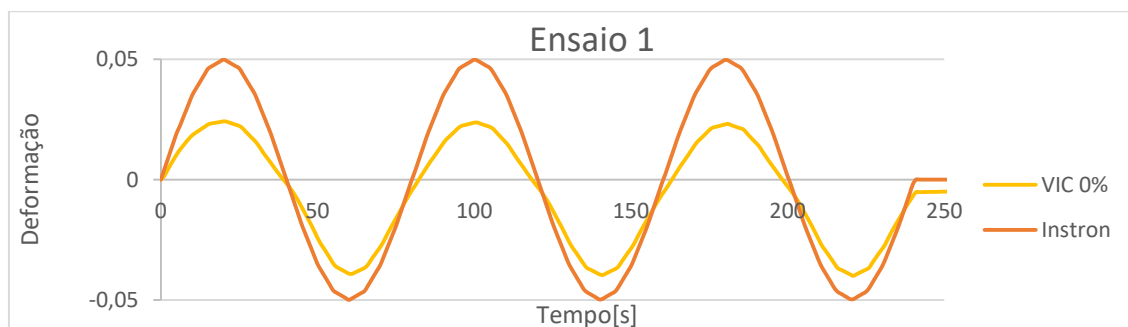


Figura 4.7 - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

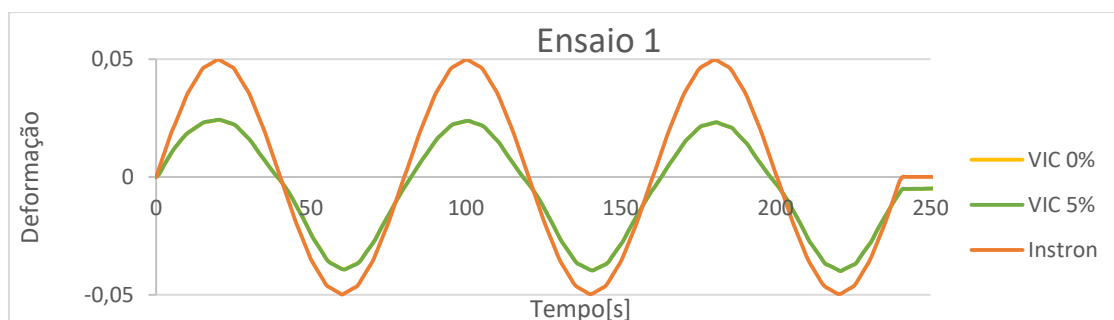


Figura 4.8 - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0 e 5% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

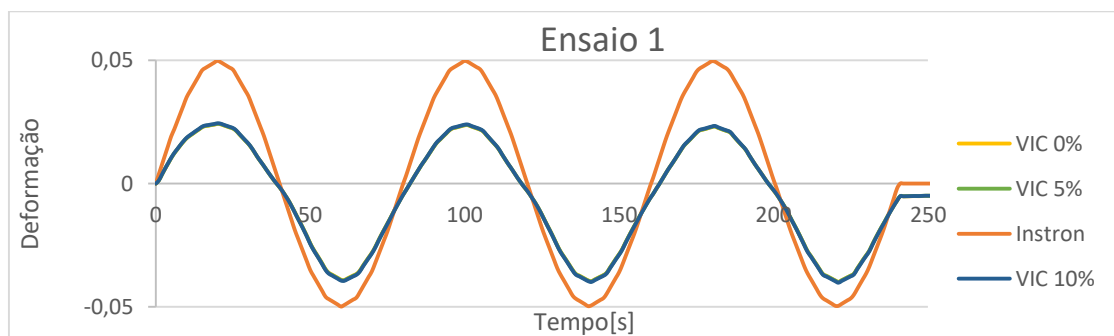


Figura 4.9 - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0, 5 e 10% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

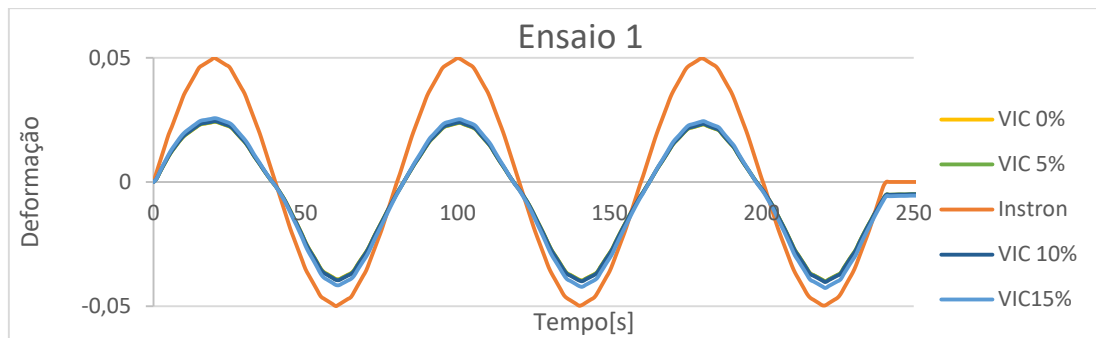


Figura 4.10 - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0, 5, 10 e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

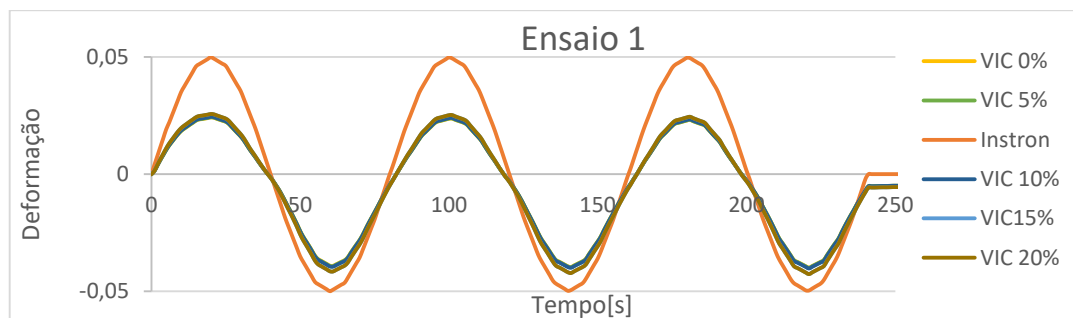


Figura 4.11 - Deformação longitudinal do provete 1 segundo o Instron e o VIC para 0, 5, 10, 15 e 20% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

Através da observação da figura 4.7-4.11 é possível analisar a deformação longitudinal sofrida pelo provete 1 segundo o registo de Instron e VIC para diversos valores de percentil definido.

Em seguida é apresentada a evolução das deformações transversais no provete 1.

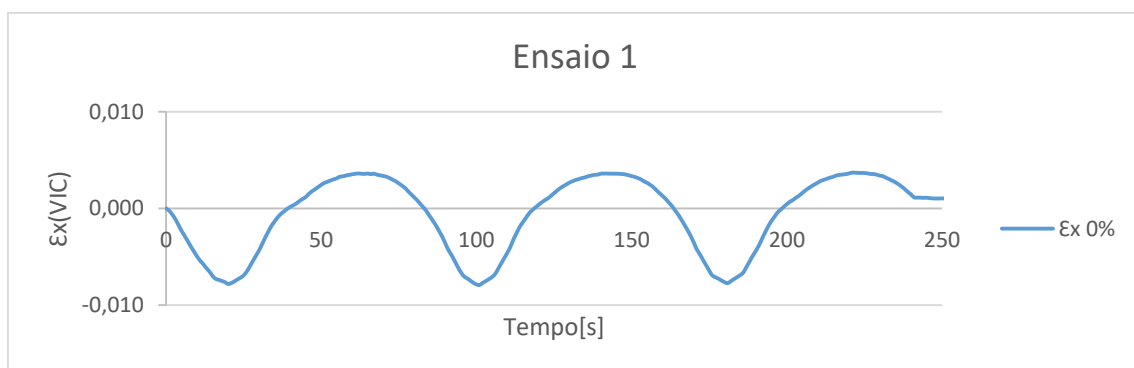


Figura 4.12. - Deformação transversal do provete 1 segundo o VIC para 0% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

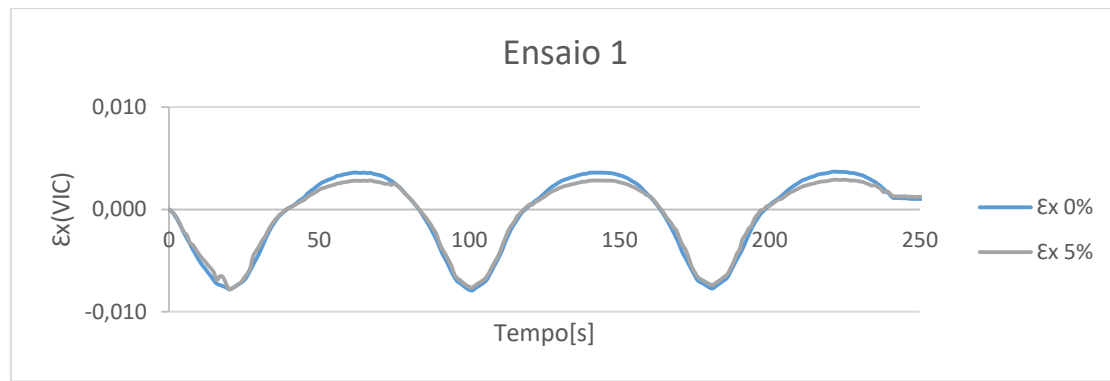


Figura 4.13 - Deformação transversal do provete 1 segundo o VIC para 0 e 5% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

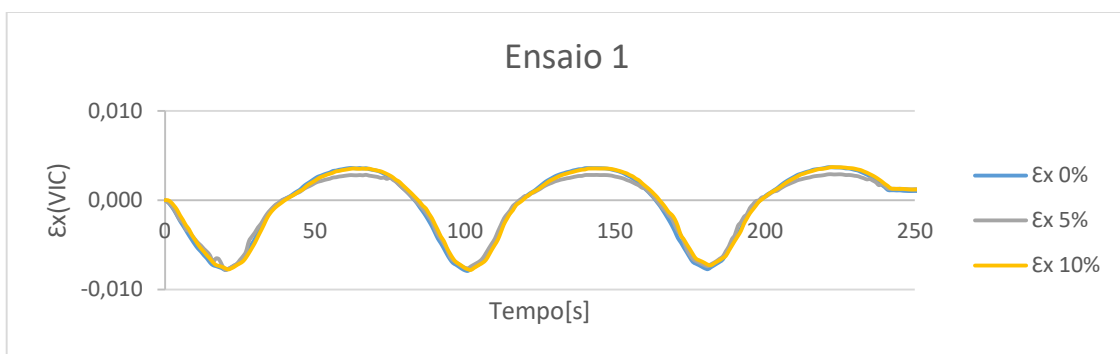


Figura 4.14 - Deformação transversal do provete 1 segundo o VIC para 0, 5 e 10% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

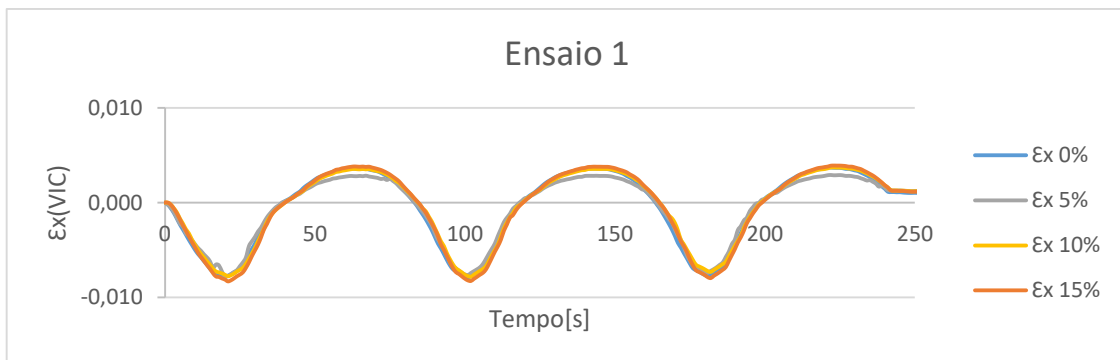


Figura 4.15 - Deformação transversal do provete 1 segundo o VIC para 0, 5, 10 e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

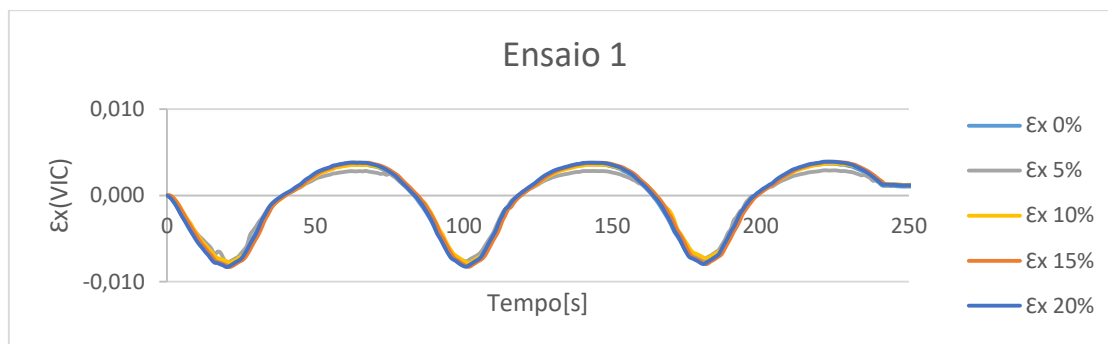


Figura 4.16 - Deformação transversal do provete 1 segundo o VIC para 0, 5, 10, 15 e 20% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas

Nas figuras 4.12-4.16 conclui-se, em primeira análise, que o tratamento efetuado com a remoção de diferentes valores percentuais de percentil leva a uma melhoria da amostra de dados e consequentemente leva à alteração dos gráficos resultantes. Contudo, verificou-se que esta melhoria deixa de ser significativa a partir do valor de 15% de percentil, onde a diferença de resultados passa a ser reduzida, podendo-se considerar que os mesmos estabilizam.

Em seguida serão apresentados os dados dos ensaios apenas para 0 e 15% de remoção dos valores de percentil e menos 5 linhas.

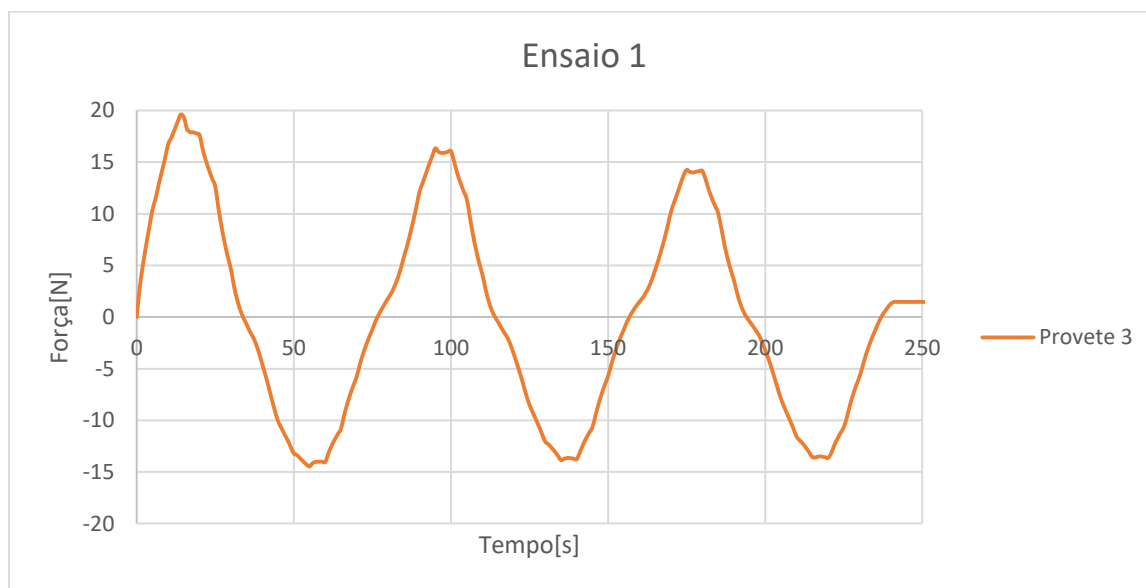


Figura 4.17– Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Segundo a observação da figura 4.17 identifica-se que no primeiro ciclo, ao se exercer tração no provete, o seu comportamento difere do registado nos restantes ciclos, pela ocorrência de uma anomalia que acaba por influenciar o comportamento do mesmo. É de assinalar que estas diferenças de comportamento verificam-se quando o provete está no ciclo de tração e por isso pode-se tratar novamente do início do descolamento, ou ocorrência do deslizamento nas garras da máquina do ensaio.

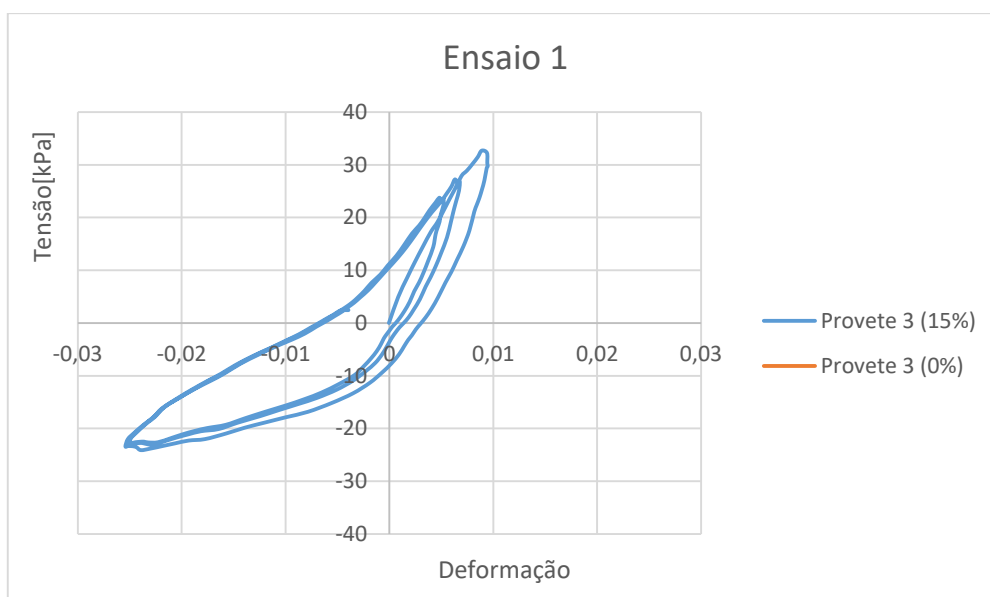


Figura 4.18 - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Na figura 4.18 é possível identificar uma variação da tensão aplicada nos diferentes ciclos de ensaio. Também é visível a coincidência de valores para 0% e 15% de percentil, denotando a existência de uma distribuição mais regular dos deslocamentos.

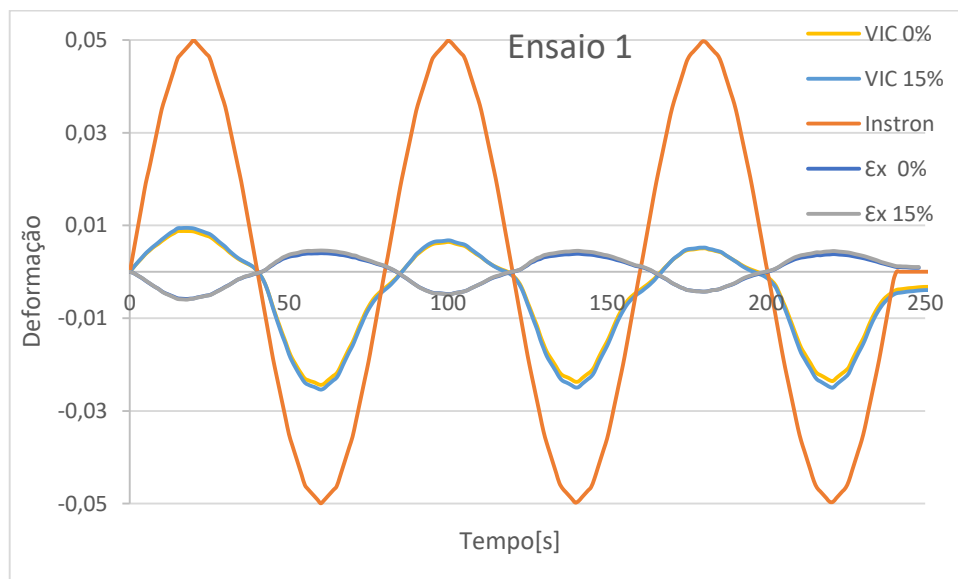


Figura 4.19 - Deformação longitudinal e transversal do provete 3 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Segundo os resultados do provete 3, a diferença apresentada entre os gráficos de Instron e VIC afirma a ocorrência de uma anomalia devido ao descolamento entre o acrílico e o provete. Este tipo de anomalia é visível na fase de compressão, sendo ainda mais expressivo na fase de tração.

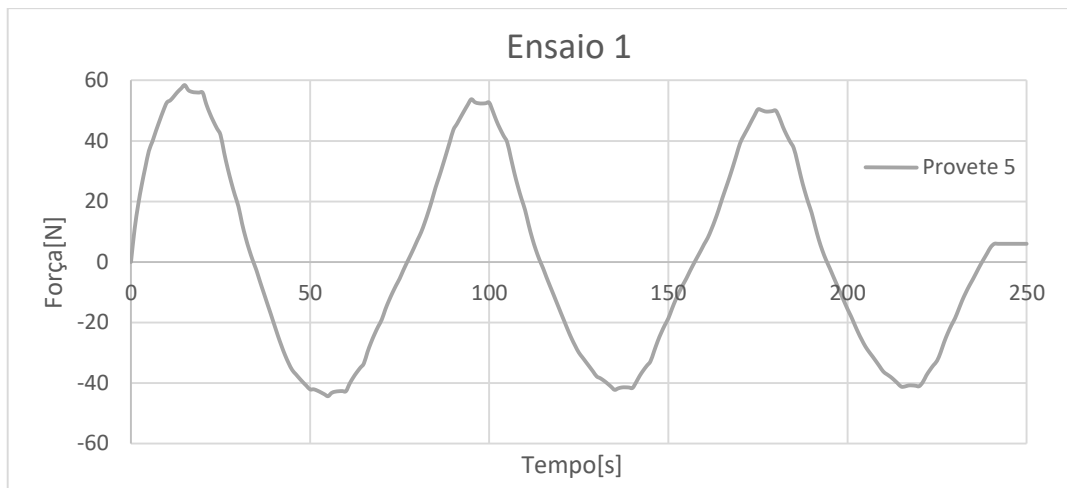


Figura 4.20 - Evolução da força aplicada na duração do ensaio

A figura 4.20 apresenta-nos uma ligeira diferença de valores na força a aplicar tanto em compressão como em tração, pela possível existência de anomalias no decorrer do ensaio.

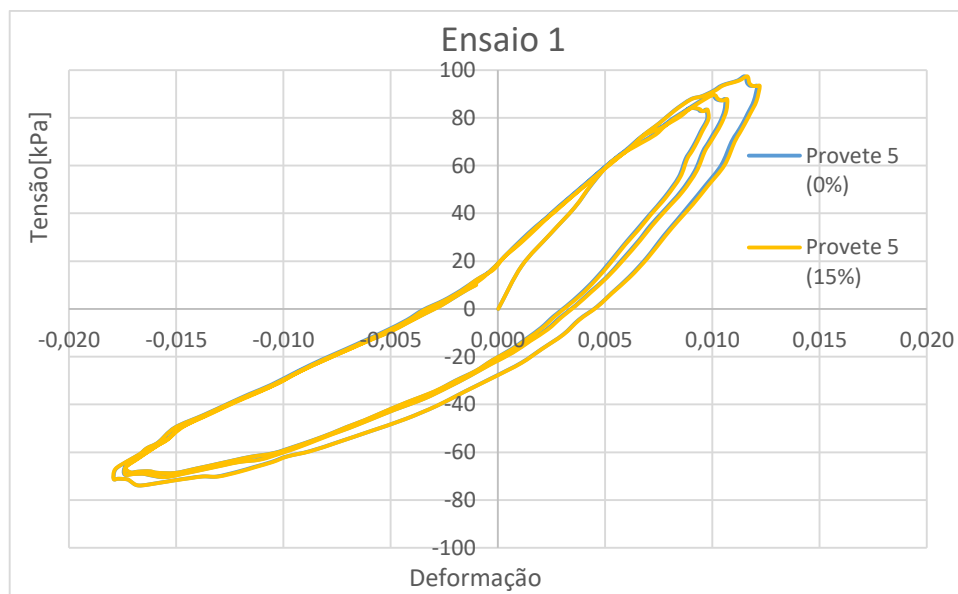


Figura 4.21 - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Relativamente aos dados observados da figura 4.21, verifica-se uma ligeira diferença nos valores de 0% e 15% de remoção no valor de percentil. De igual forma é identificada uma oscilação dos valores de tensão e deformação presentes de ciclo para ciclo.

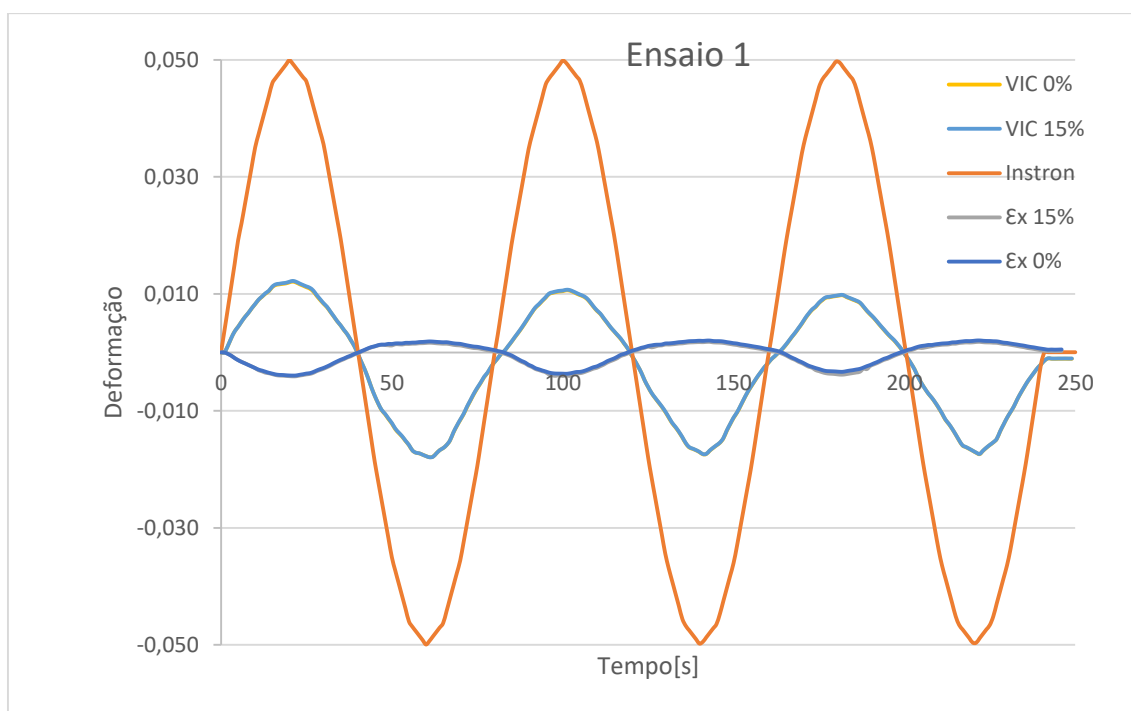


Figura 4.22 - Deformação longitudinal e transversal do provete 5 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Através da observação das figuras anteriores, verifica-se mais uma vez a existência de diferenças significativas no registo do Instron e do VIC. A variação dos valores nos diferentes ciclos é devida ao descolamento dos acrílicos com o provete, ou à grande deformação na zona da colagem.

Os dados referentes à deformação transversal para 0 e 15% apresentam uma ligeira diferença, localizada na fase de compressão.

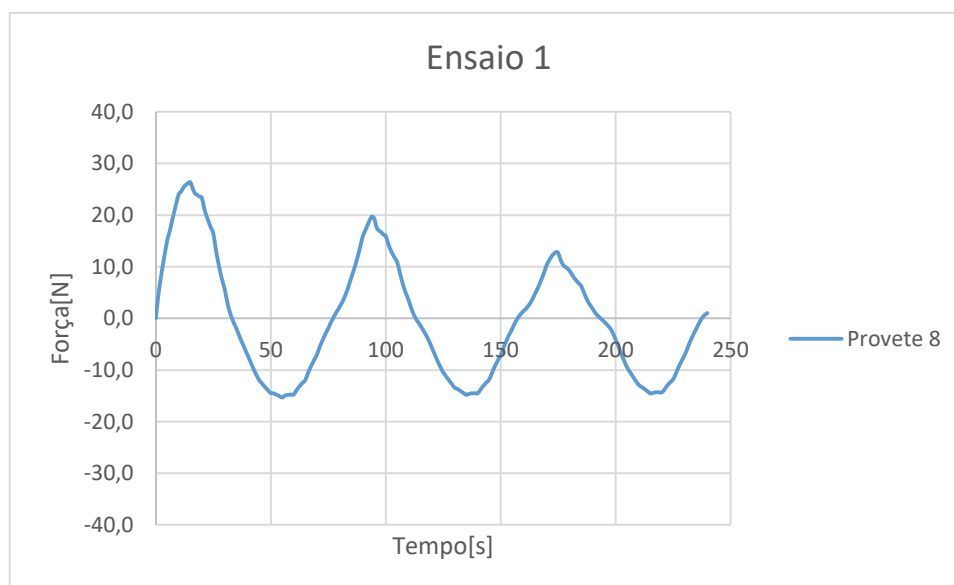


Figura 4.23 - Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Através da análise da figura 4.23 é possível retirar as mesmas ilações até agora recolhidas, observando-se que a aplicação de força no provete 8 é decrescente no decorrer do ensaio. Esta situação ocorre apenas na fase de tração.

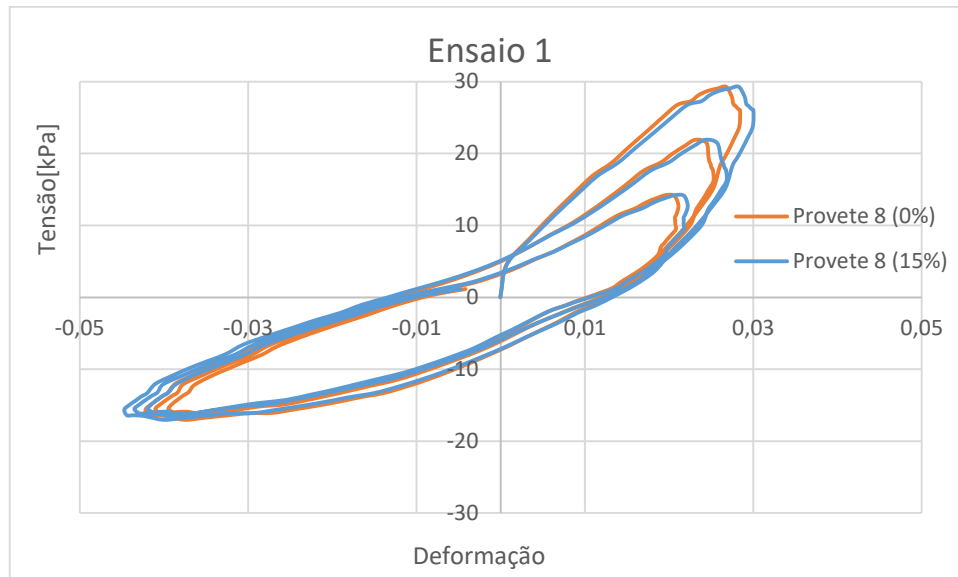


Figura 4.24 - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Para o provete 8 observa-se uma diferença entre os valores com 0 e 15% de remoção de percentil, tanto na fase de compressão como na fase de tração. Na direção L observa-se que, com o decorrer dos ensaios, as forças a aplicar vão diminuindo de ciclo para ciclo. Este comportamento deve-se à descolagem gradual entre o provete e o acrílico.

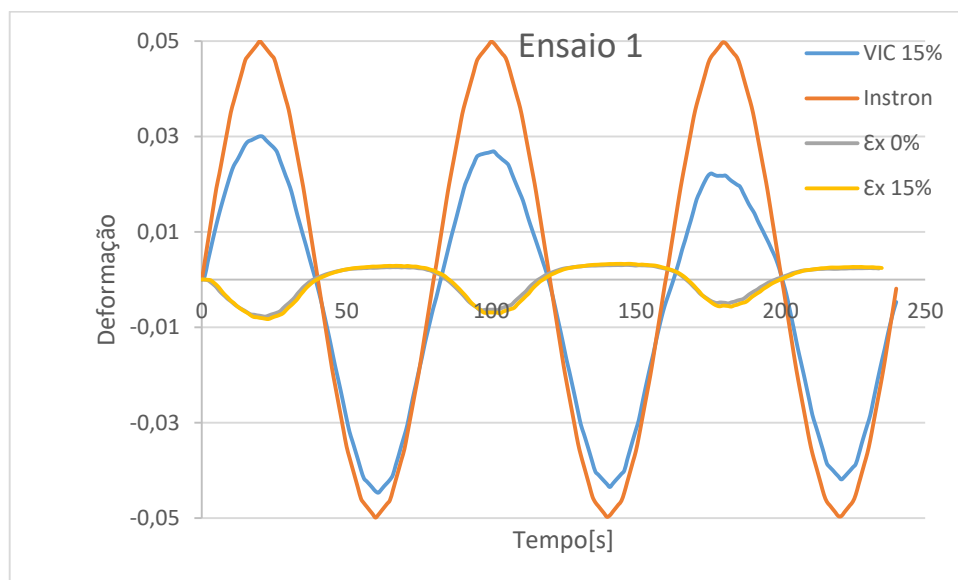


Figura 4.25 - Deformação longitudinal e transversal do provete 8 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Pela análise da figura 4.25 verifica-se que os valores de Instron e de VIC aproximam-se na fase de compressão, sendo possível introduzir a deformação pretendida nesta fase. Na fase de tração não aconteceu o mesmo, observando-se uma elevada diferença entre os valores de Instron e VIC.

Segundo o gráfico da figura 4.25 as deformações transversais do provete 8 ocorreram sem qualquer anomalia.

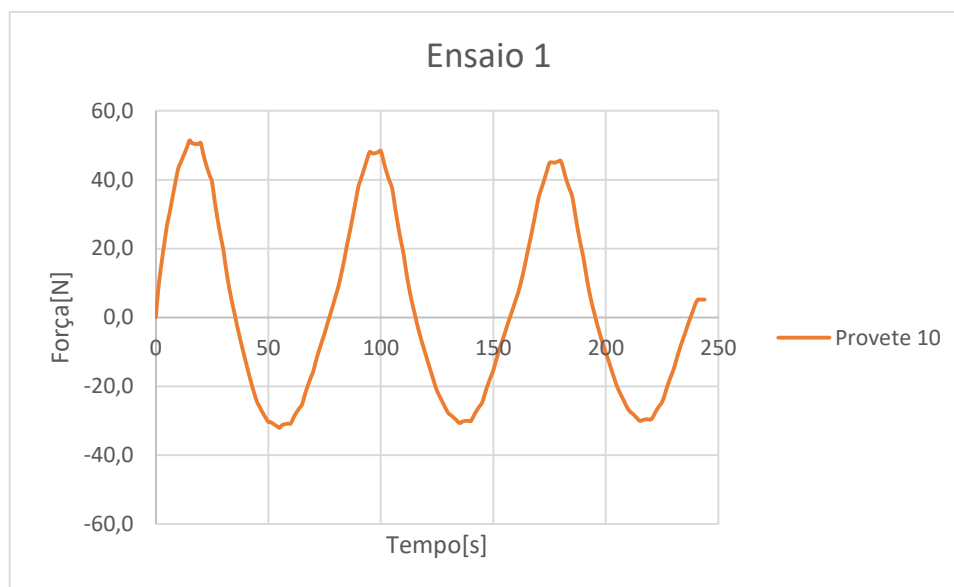


Figura 4.26 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Segundo a figura 4.26, tem-se a informação que os valores extremos da força aplicada no provete são aproximadamente constante.

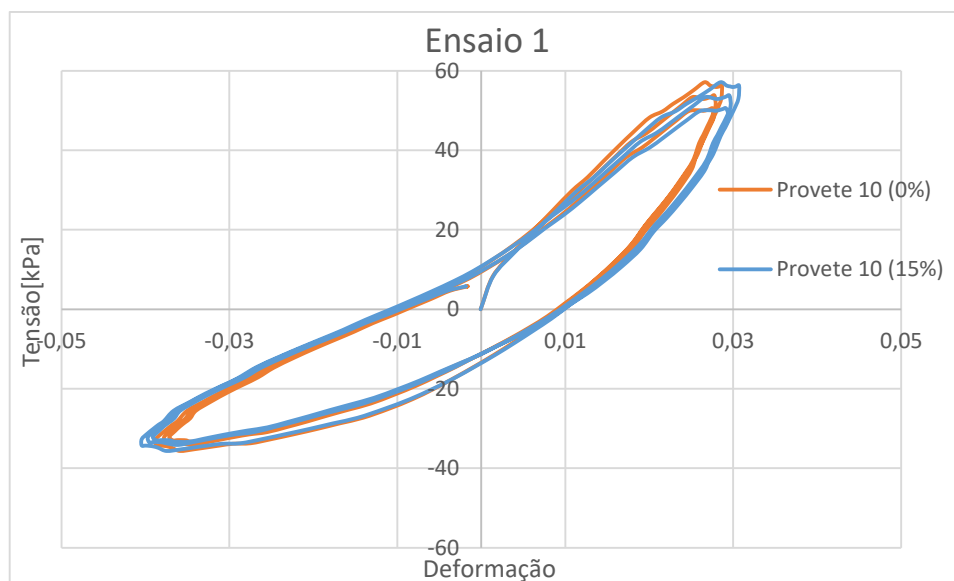


Figura 4.27– Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Na figura 4.27 observa-se que a aplicação da tensão no ensaio é realizada de uma forma quase regular, tendo em conta a pequena oscilação existente nos diferentes ciclos.

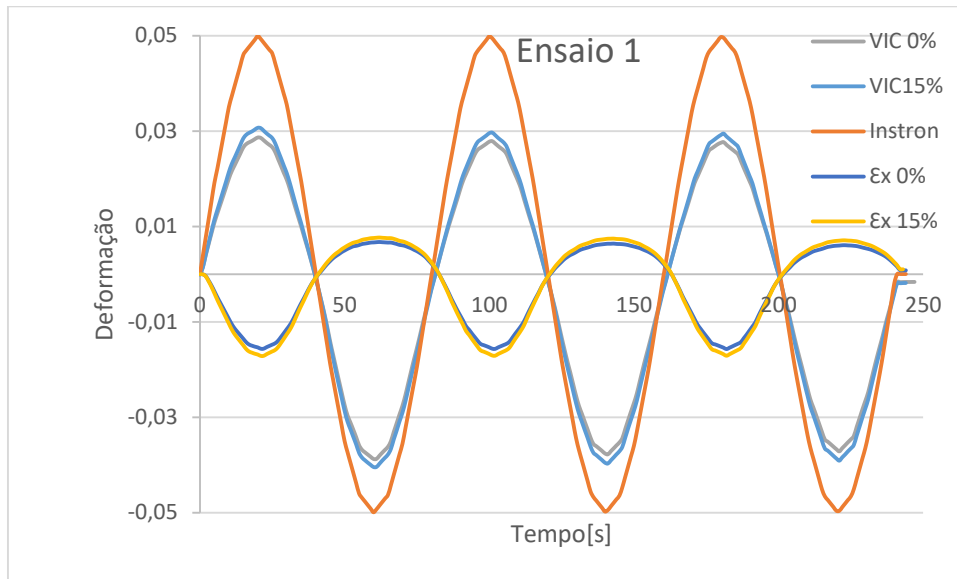


Figura 4.28 – Deformação longitudinal e transversal do provete 10 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Na figura 4.28 é apresentada a informação registada pelo VIC e pelo Instron onde é possível verificar a existência de diferenças entre os mesmos. Essas diferenças são cerca de 30%.

O estudo do provete 11 é apresentado nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31.

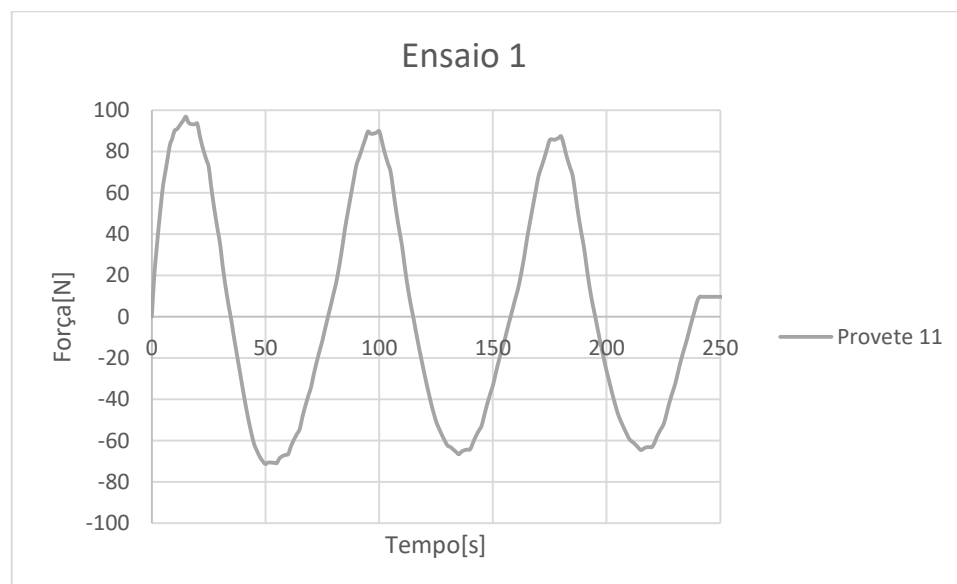


Figura 4.29 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Na figura 4.29 é demonstrado de igual forma que as forças aplicadas podem ser consideradas constantes, identificando-se uma ligeira diferença do primeiro para o segundo ciclo.

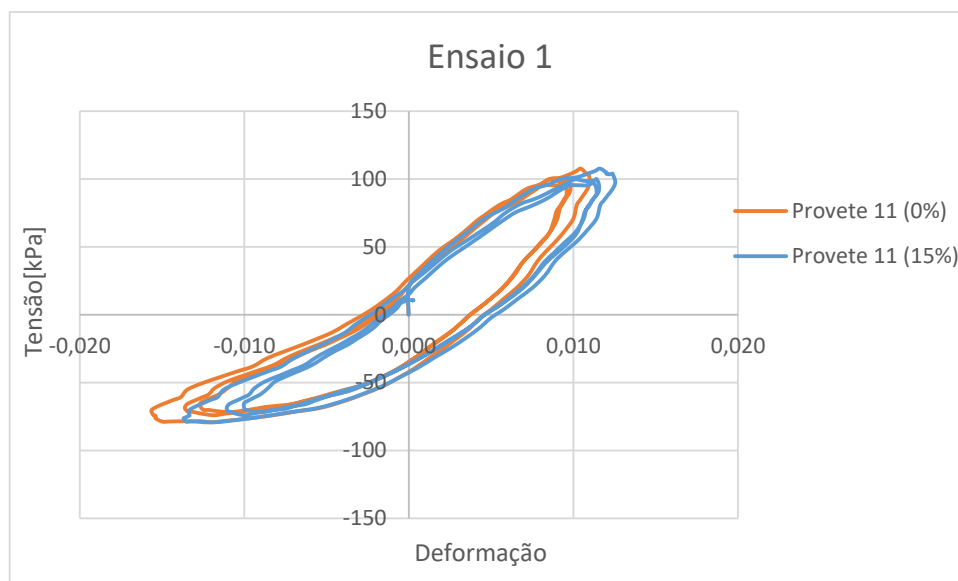


Figura 4.30 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

A figura 4.30 mostra os resultados da tensão aplicada e a respetiva deformação sofrida pelo provete 11. Verifica-se a existência de resultados menos regulares, podendo resultar da existência de anomalias no decorrer do ensaio. Contudo, é possível afirmar que a diferença de valores nos diferentes ciclos é maior do primeiro ciclo para os restantes.

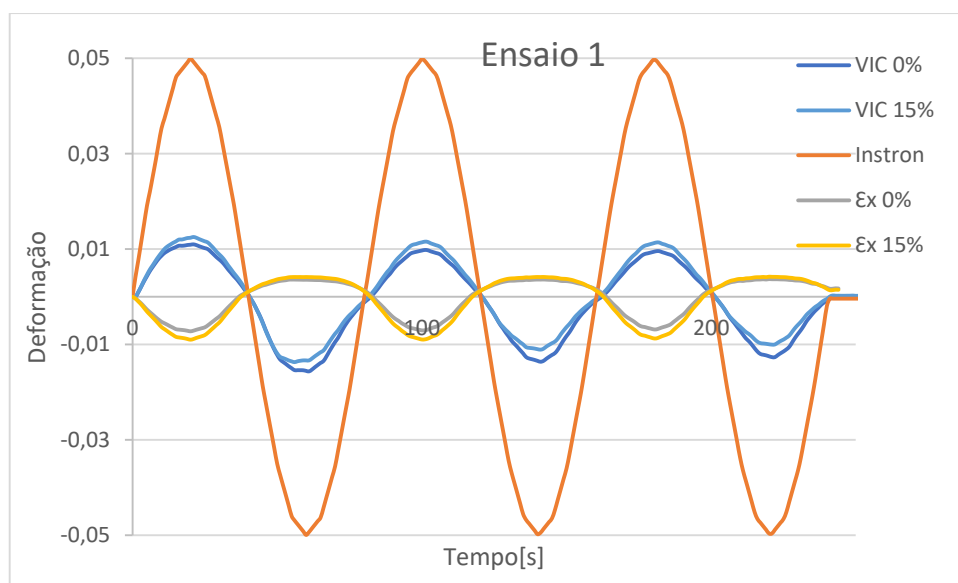


Figura 4.31 – Deformação longitudinal e transversal do provete 11 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Pela observação da figura 4.31, verifica-se que as diferenças entre as medições do Instron e do VIC são de 77% aproximadamente.

Os resultados do ensaio 2 do provete 11 não são indicados por o mesmo ter rompido durante a realização do ensaio.

4.3.2. Apresentação dos resultados para deformações longitudinais segundo a orientação T

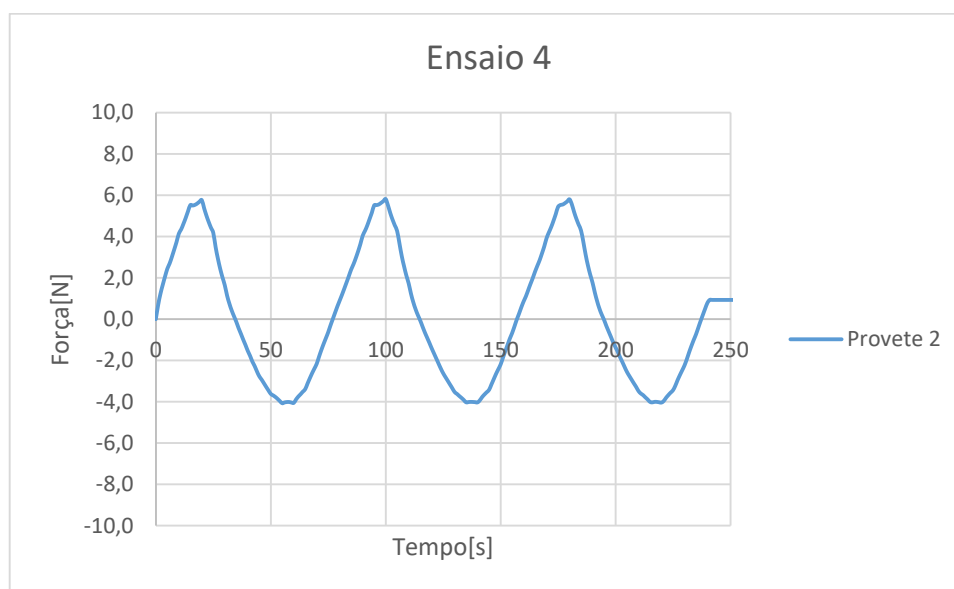


Figura 4.32 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Da figura 4.32 é possível afirmar que as forças extremas aplicadas no decorrer do ensaio são constantes.

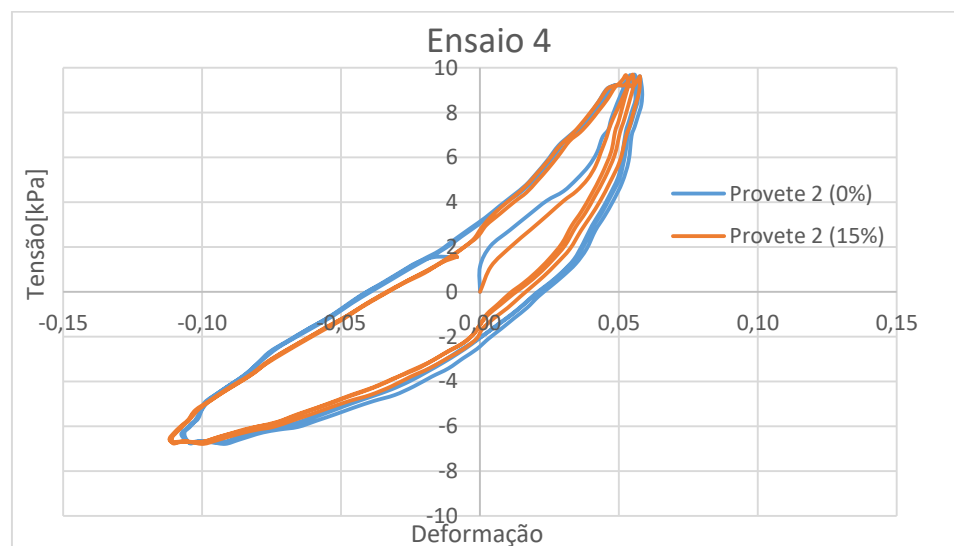


Figura 4.33 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Pela observação da figura 4.33 identifica-se que as histereses no primeiro, segundo e terceiro ciclo são similares, o que indica a ocorrência de um ensaio sem descolamento ou sem deslizamentos entre a peça de acrílico e as garras da máquina Instron.

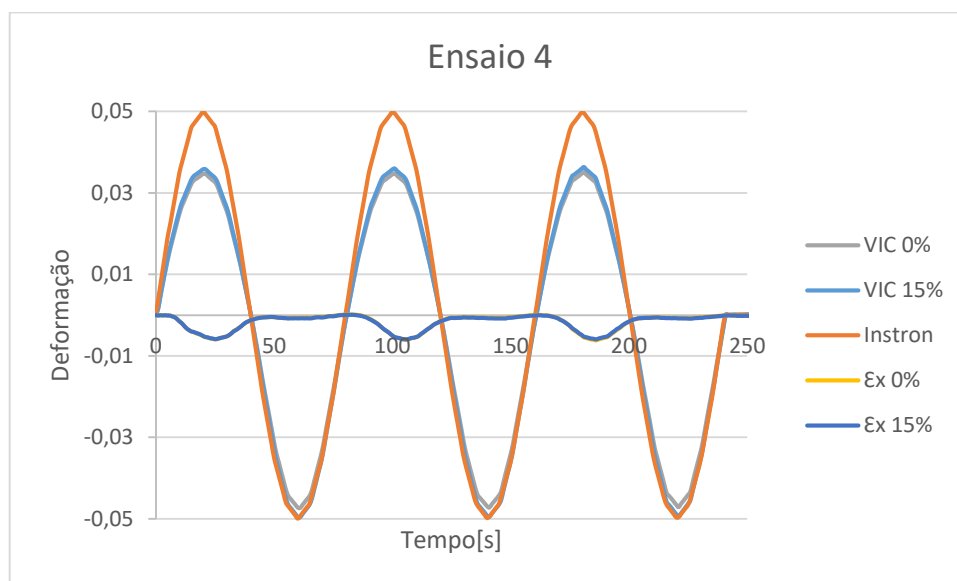


Figura4.34 – Deformação longitudinal e transversal do provete 2 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Nos resultados provenientes do Instron e do VIC, observa-se uma semelhança nas deformações positivas (tração), verificando-se o oposto para deslocamentos negativos (compressão).

Para uma melhor análise das deformações transversais são observados os gráficos dos mesmos separadamente.

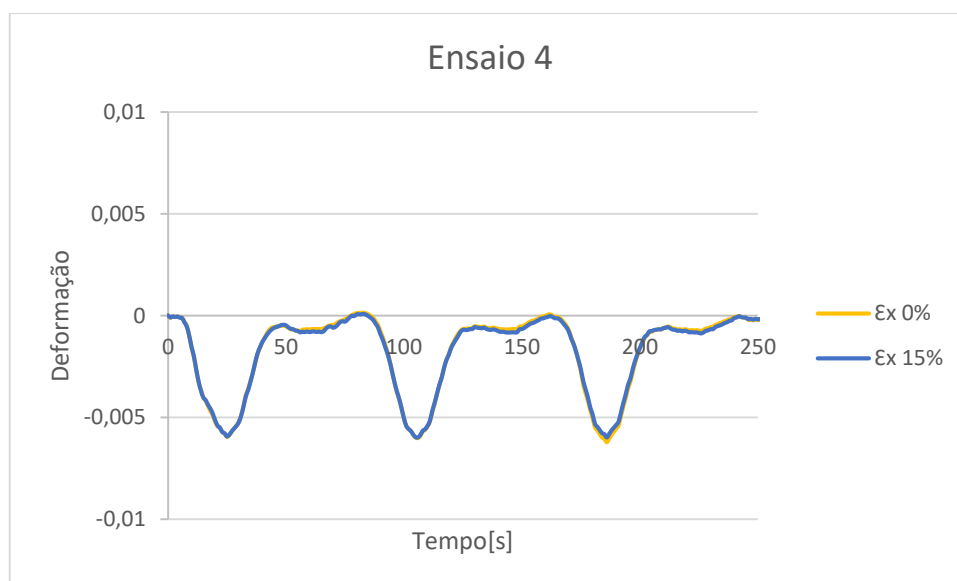


Figura4.35 – Deformação transversal do provete 2 segundo o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Segundo a figura 4.35 observa-se que para o provete 2 as deformações transversais são registadas sobretudo na fase de compressão, não sendo tão elevadas na fase de tração. O facto dos valores registados para a tração não serem os esperados sugere a possibilidade de o provete ter descolado dosacrílicos, nas suas extremidades.

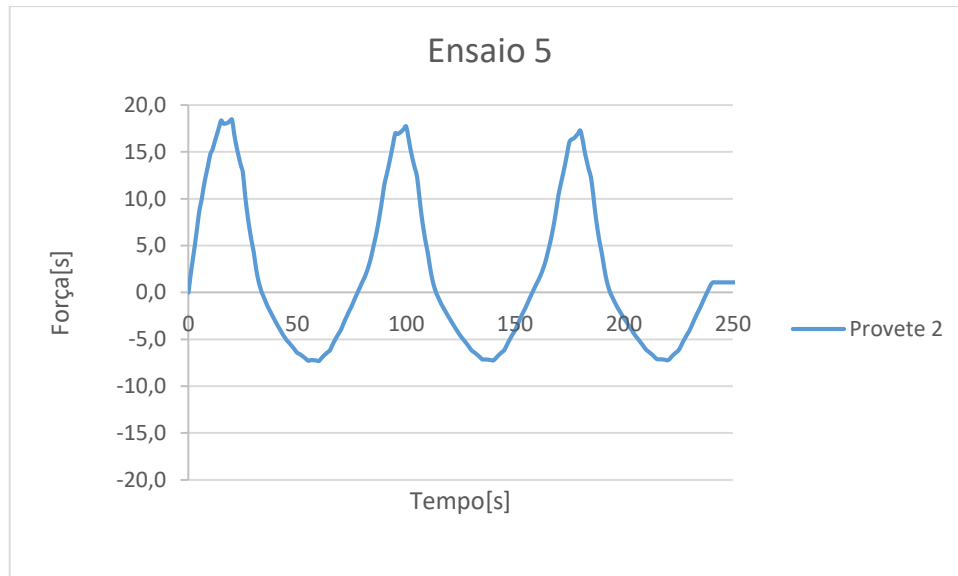


Figura 4.36 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

É possível, pela observação da figura 4.36, verificar que os valores extremos em módulo das forças aplicadas são constantes.

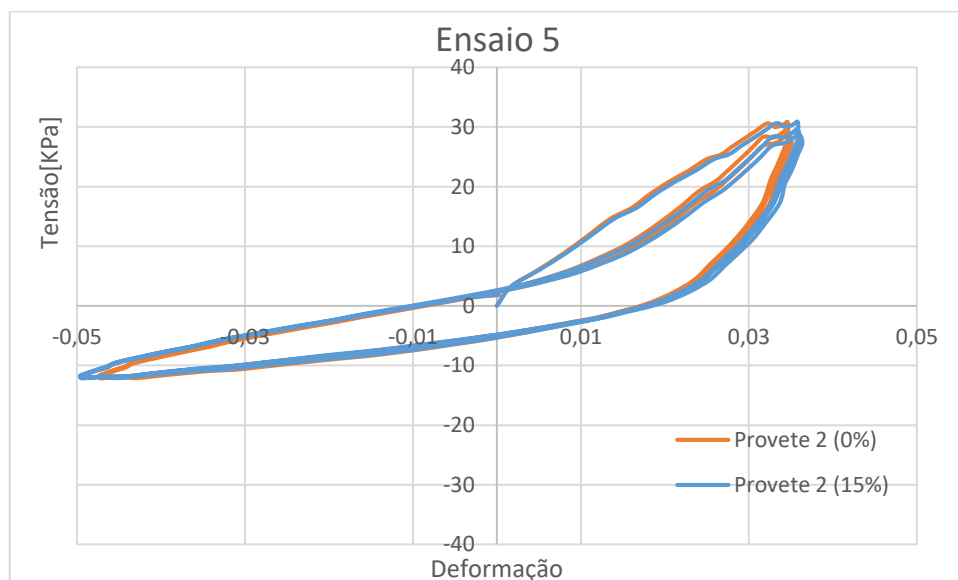


Figura 4.37 - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

De forma idêntica, verifica-se que a histerese no início do primeiro ciclo não apresenta uma configuração habitual, denotando a existência de anomalias no início do ensaio.

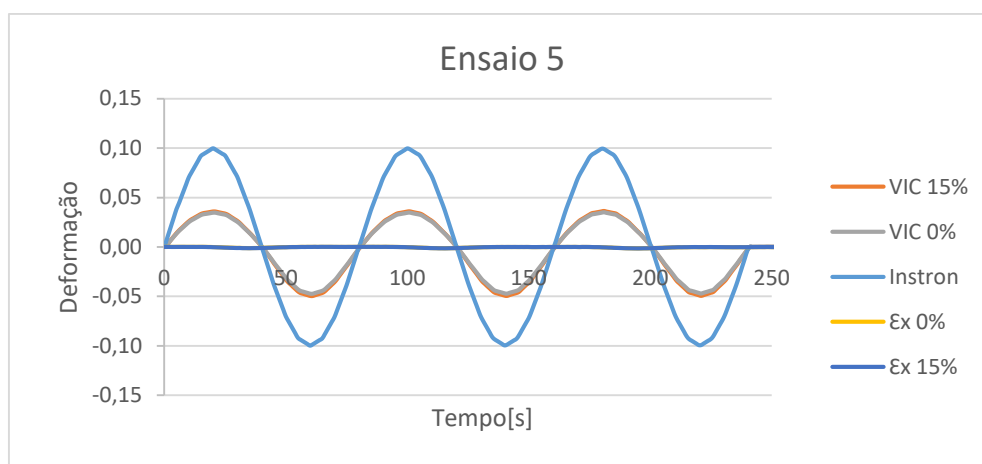


Figura 4.38 – Deformação longitudinal e transversal do provete 5 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Através da figura 4.38 observa-se que os resultados do Instron e do VIC são bastantes diferentes, registando-se uma diferença de 45% entre eles.

Os resultados do VIC com 0 e 15% de eliminação de pertencil apresentam valores muito idênticos, verificando-se apenas uma ligeira diferença nas extremidades.

De igual forma, serão apresentadas separadamente as deformações transversais com o intuito de serem mais perceptível as diferenças entre elas.

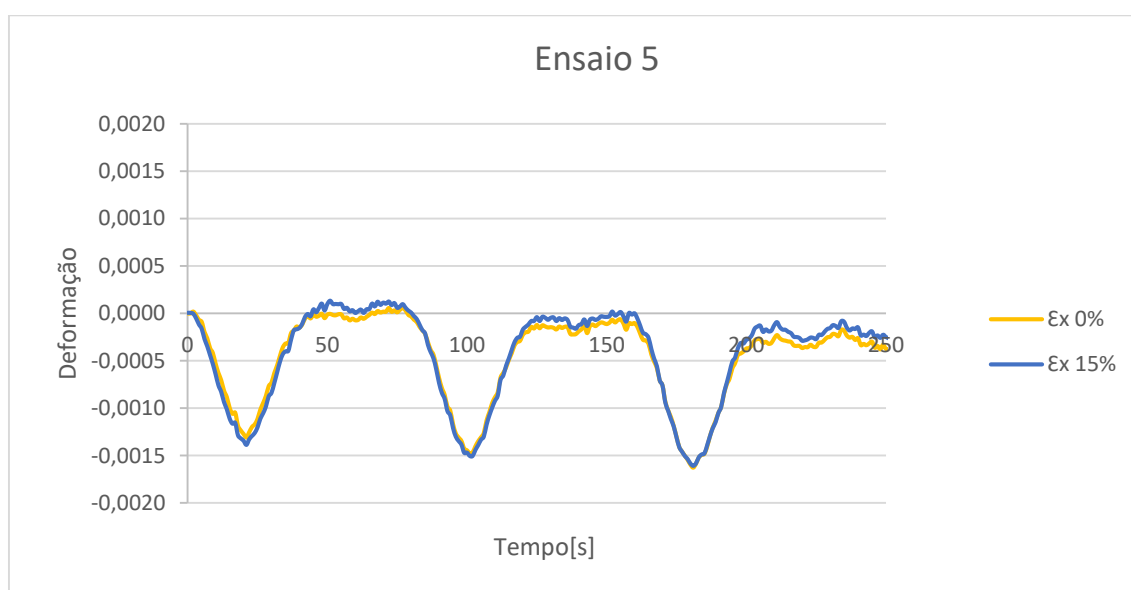


Figura 4.39 – Deformação transversal do provete 2 segundo o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Verifica-se que para o ensaio 5 as deformações transversais com 0 e 15% de eliminação de percentil diferem sobretudo na fase de tração.

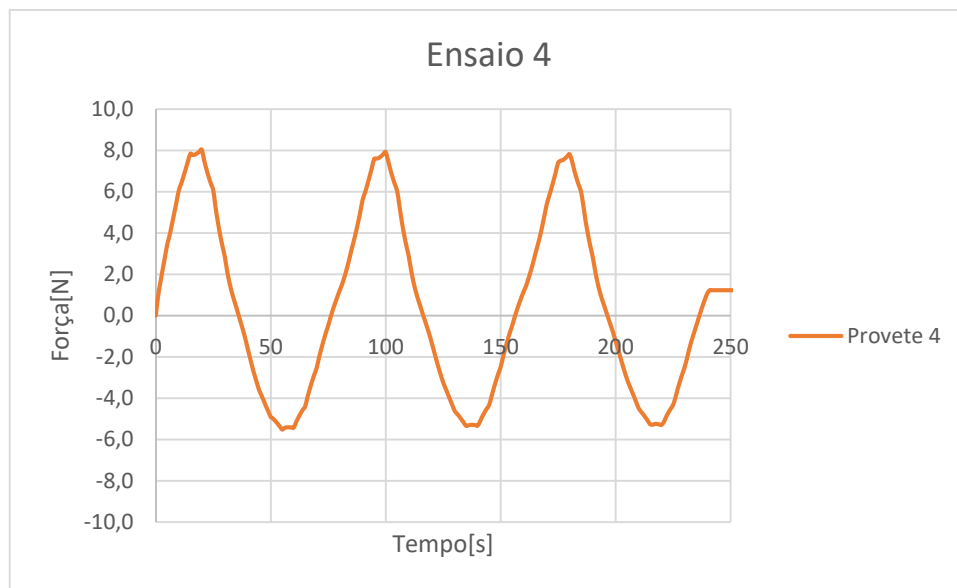


Figura 4.40 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Segundo a figura 4.40, é possível afirmar que o ensaio 4 para o provete 4 realizou-se de forma a que as forças extremas apresentem resultados constantes.

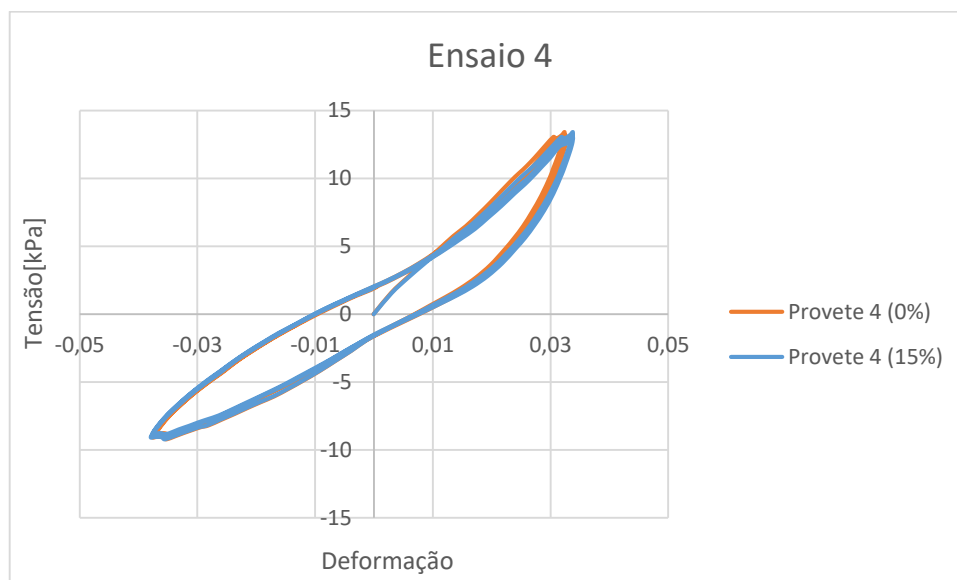


Figura 4.41 - Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Pela observação da figura 4.41 observa-se a existência da histerese sem a apresentação de anomalias. Apenas é possível identificar na fase de tração uma diferença de valores entre 0 e 15% de eliminação de percentil.

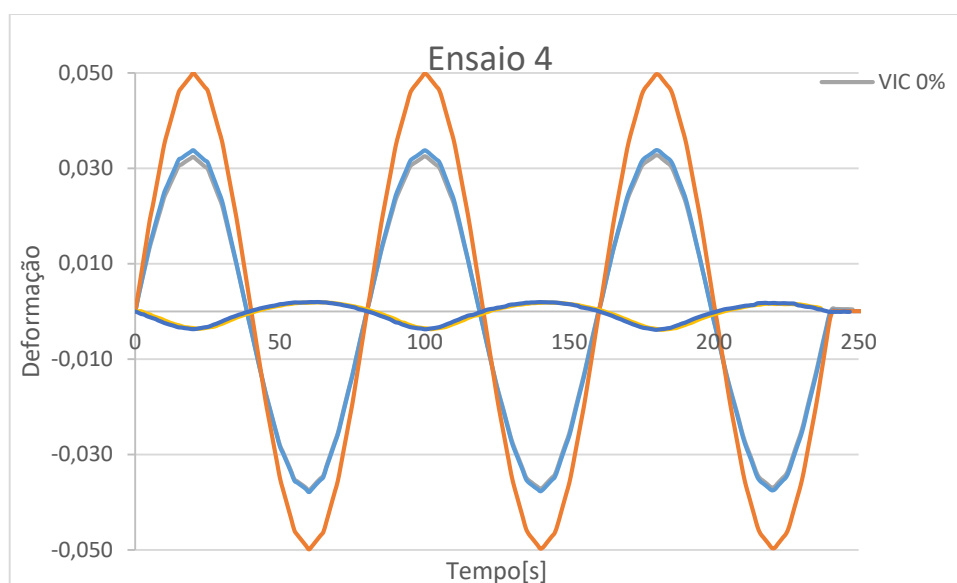


Figura 4.42 – Deformação longitudinal e transversal do provete 4 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Segundo o registo entre o VIC e o Instron, na figura 4.42, verifica-se que existe uma diferença entre os valores dos mesmos de cerca de 35%.

Os registos do VIC para 0 e 15% de eliminação de percentil diferem muito pouco.

Mais uma vez são apresentadas separadamente as deformações transversais com o intuito de serem mais perceptíveis.

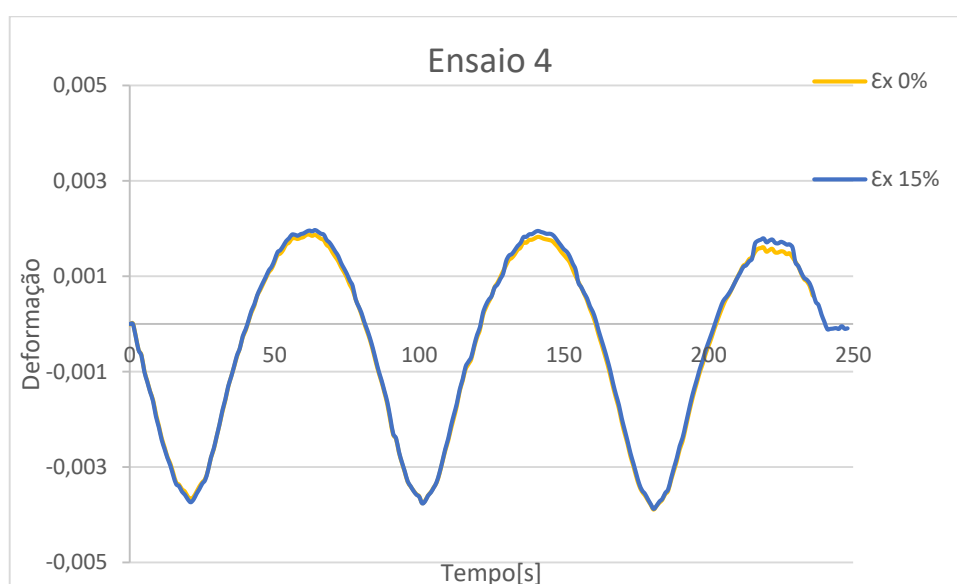


Figura 4.43 – Deformação transversal do provete 4 segundo o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Para as deformações transversais observa-se um registo regular, bem delineado por forma a serem bem perceptível os três diferentes ciclos a que o provete foi sujeito. De notar a ligeira diferença de valores de deformação para os diferentes valores de percentil utilizados.

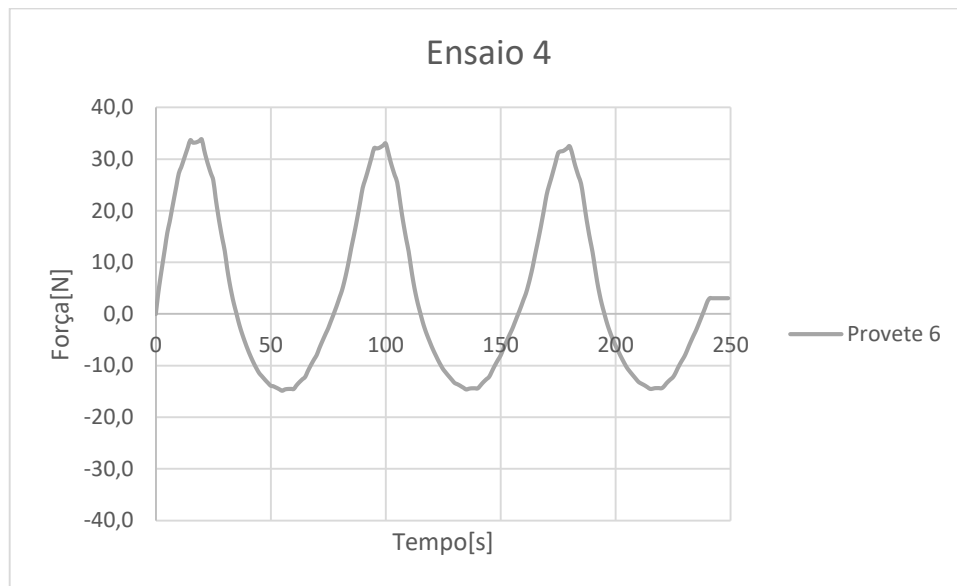


Figura 4.44 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Segundo a figura 4.44 a força aplicada, em módulo, durante o ensaio é constante, sendo bem visíveis os três ciclos de ensaio.

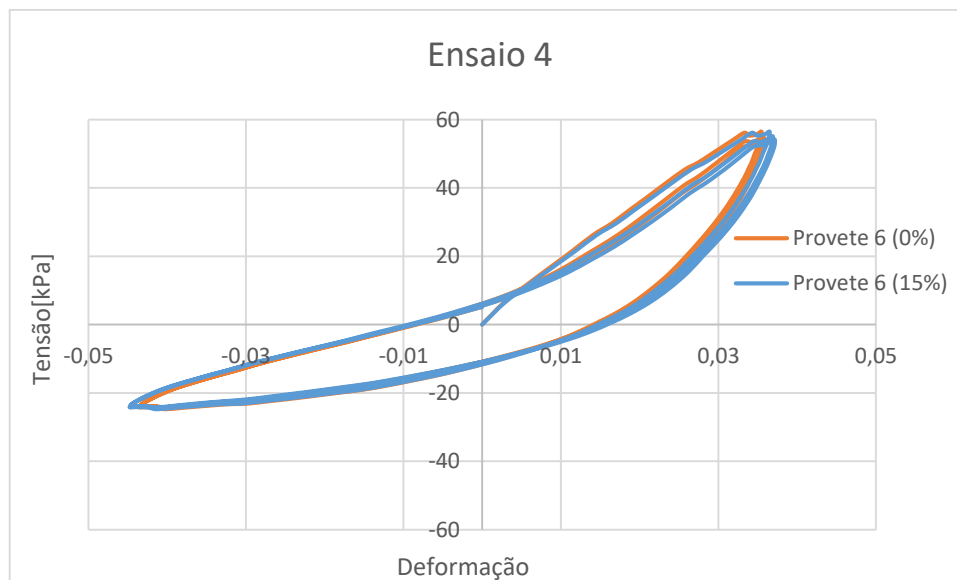


Figura 4.45 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Pela observação da figura 4.45, identifica-se que as histereses dos três ciclos são muito similares, demonstrando a correta realização do ensaio.

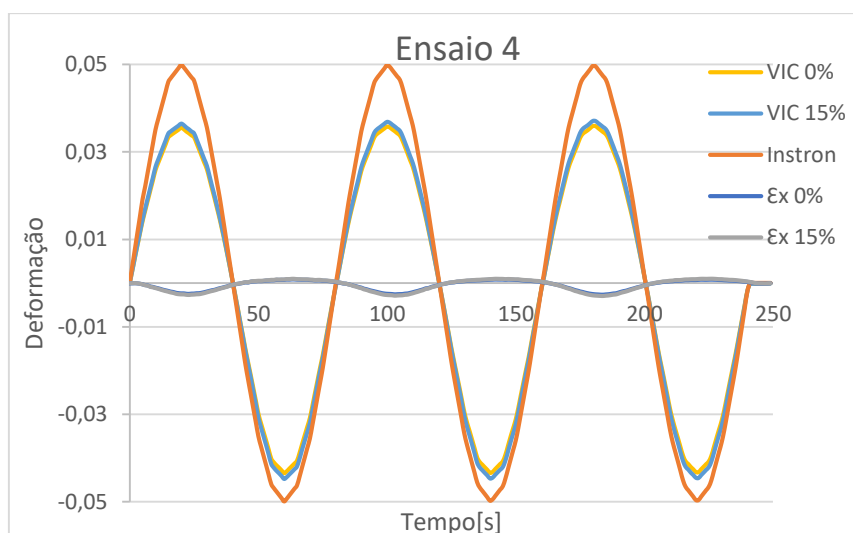


Figura 4.46 – Deformação longitudinal e transversal do provete 6 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Para o ensaio 4 do provete 6 verifica-se que segundo diferentes percentagens de percentil utilizado os valores variam ligeiramente, sendo mais explicito estas diferenças nas extremidades. Os valores de VIC com 15% de percentil diferem cerca de 17% comparativamente aos dados registados do Instron.

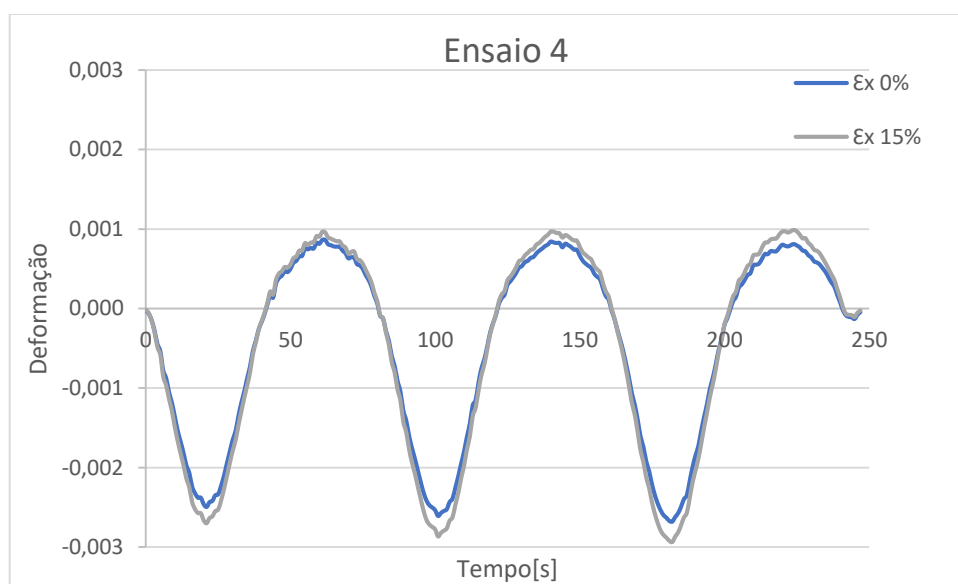


Figura 4.47 – Deformação transversal do provete 6 segundo o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

No ensaio 4 para o provete 6, as deformações transversais são registadas normalmente na fase de compressão e na fase de tração.

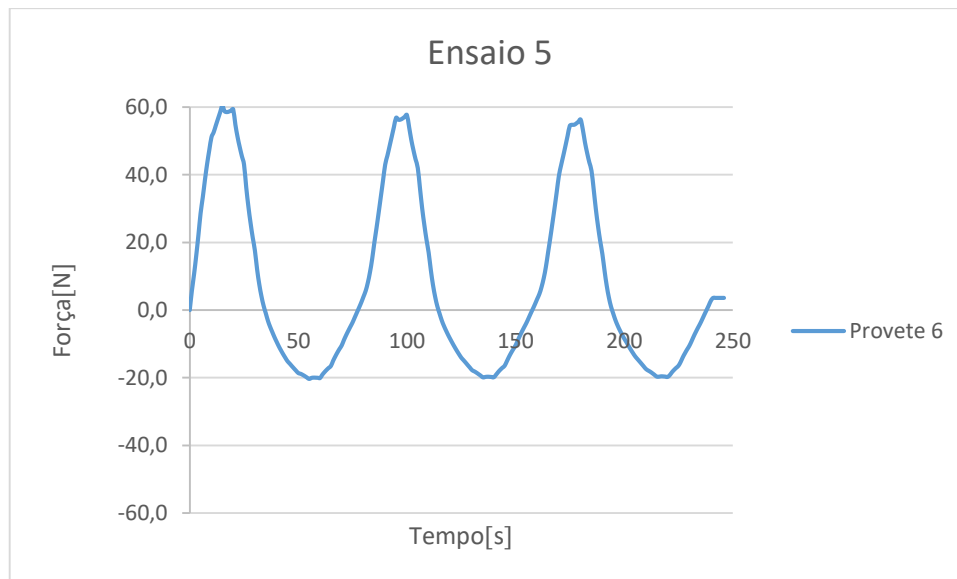


Figura 4.48 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Pela observação da figura 4.48 verifica-se que a aplicação da força aplicada é muito maior na fase de tração do que a força aplicada na fase de compressão.

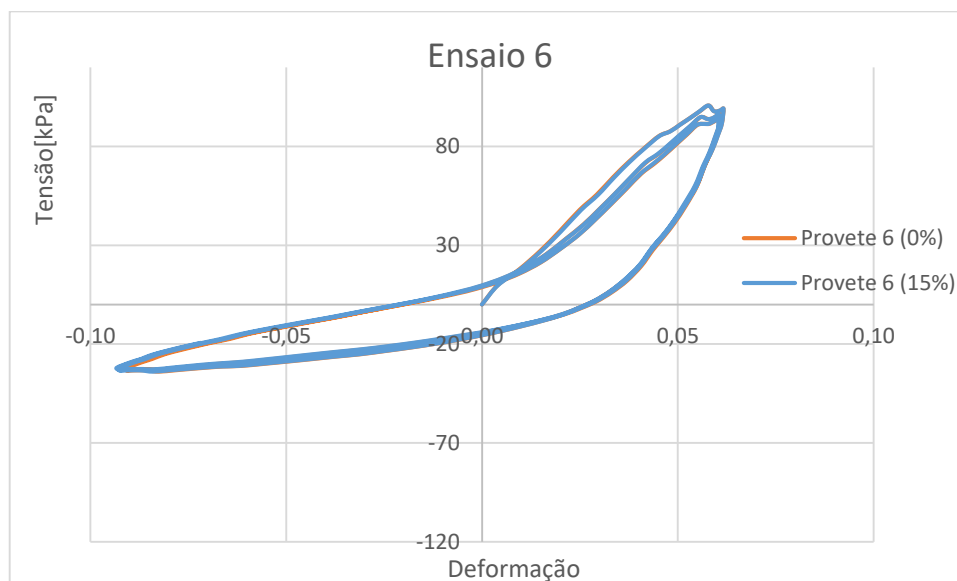


Figura 4.49 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

O comportamento do provete 6, segundo a figura 4.49, apresenta uma variação do seu comportamento na histerese do primeiro ciclo.

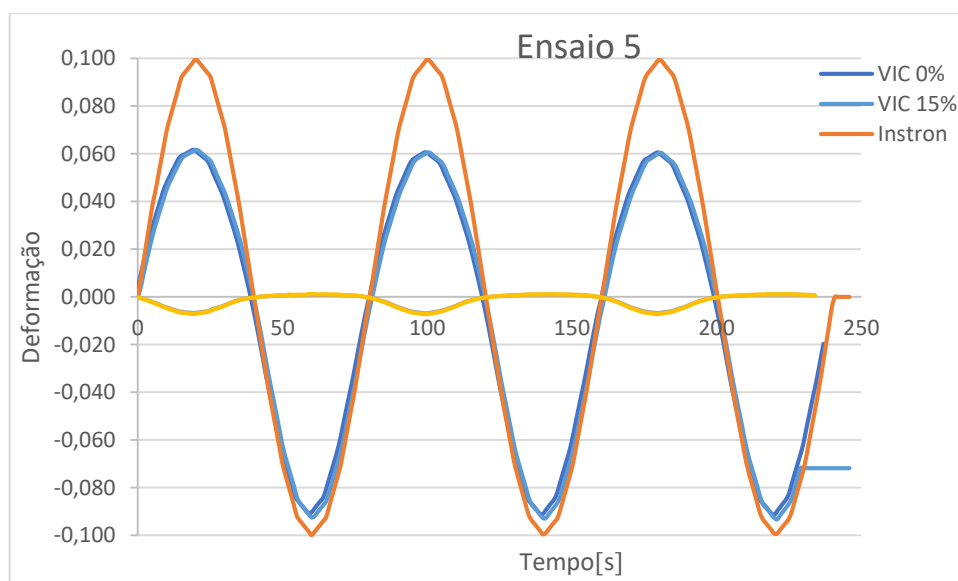


Figura 4.50 – Deformação longitudinal e transversal do provete 6 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Segundo os resultados observados na figura 4.50 pode-se concluir que os valores do VIC diferem dos valores do Instron, aproximadamente 22%. Esta diferença é mais explícita na fase de tração onde os valores entre VIC e Instron diferem mais.

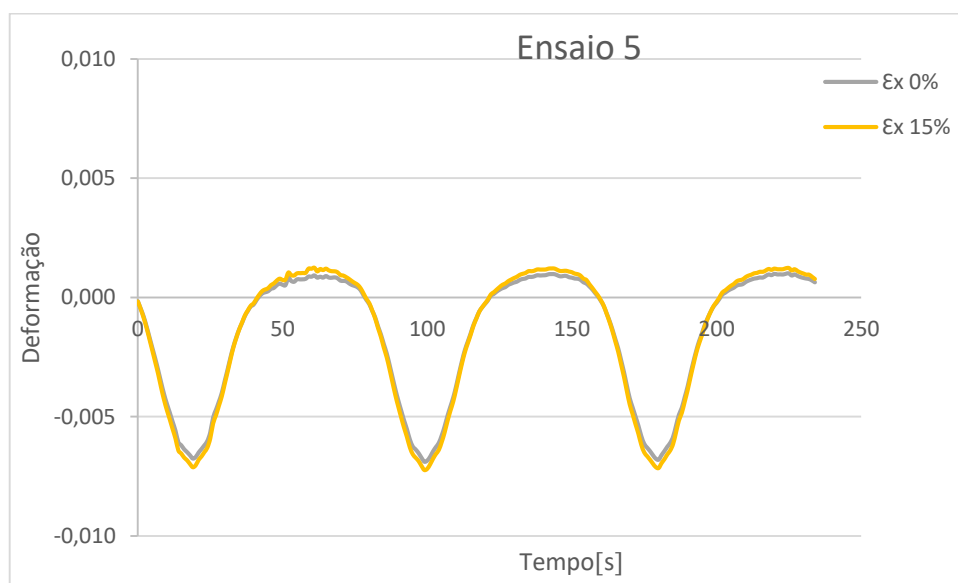


Figura 4.51– Deformação transversal do provete 6 segundo o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Na figura 4.51 é possível observar a deformação transversal do provete 6 para o ensaio 5. A deformação à compressão regista-se de uma forma normal, sendo possível identificar os diferentes ciclos do ensaio.

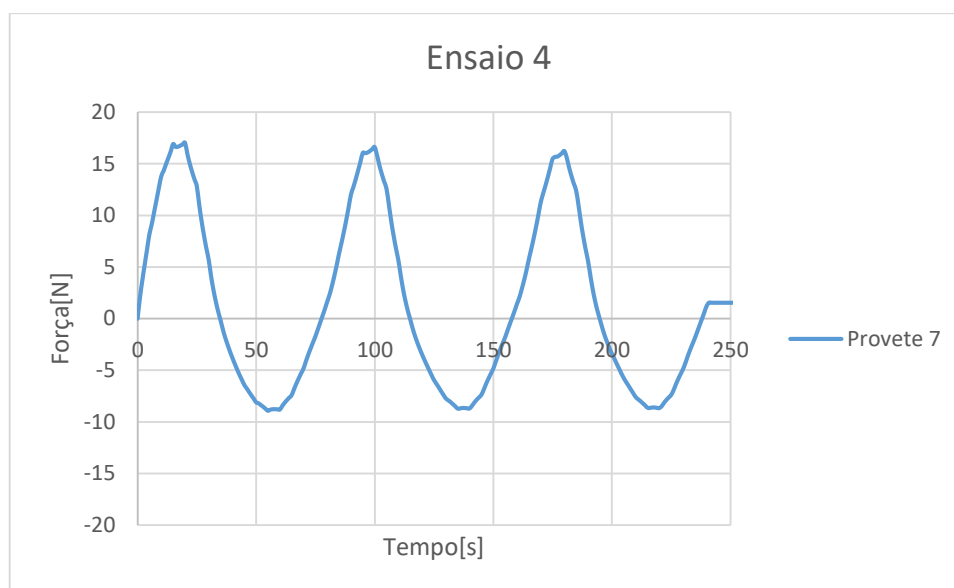


Figura 4.52 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Para os valores registados pelo VIC e pelo Instron verifica-se, uma vez mais, a aplicação de uma força regular, no decorrer do ensaio, apresentando os seus valores extremos aproximadamente constantes.

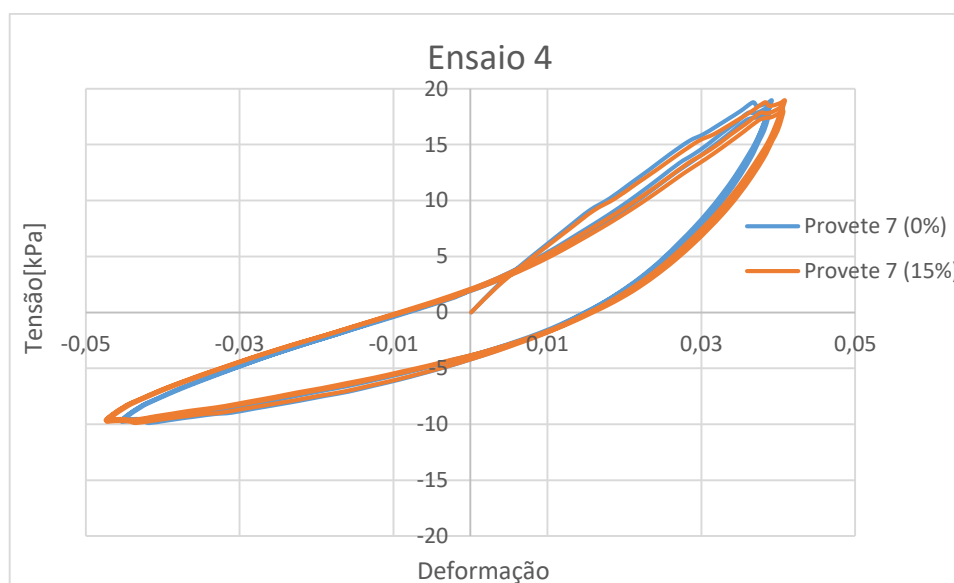


Figura 4.53– Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

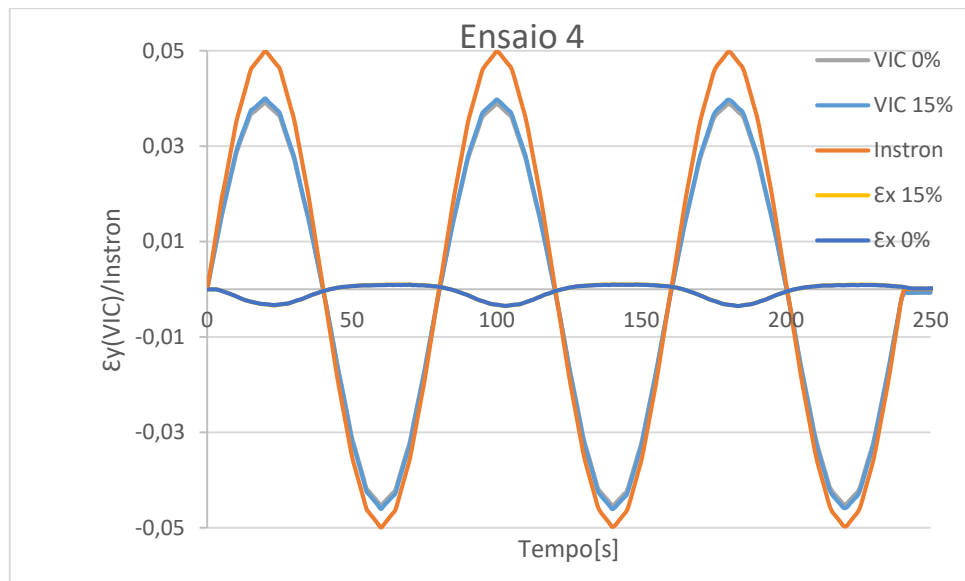


Figura 4.54 – Deformação longitudinal e transversal do provete 7 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

No provete 7 observa-se uma aproximação entre os valores do Instron e os do VIC na fase de compressão, registrando-se, neste caso, diferenças na ordem dos 15%.

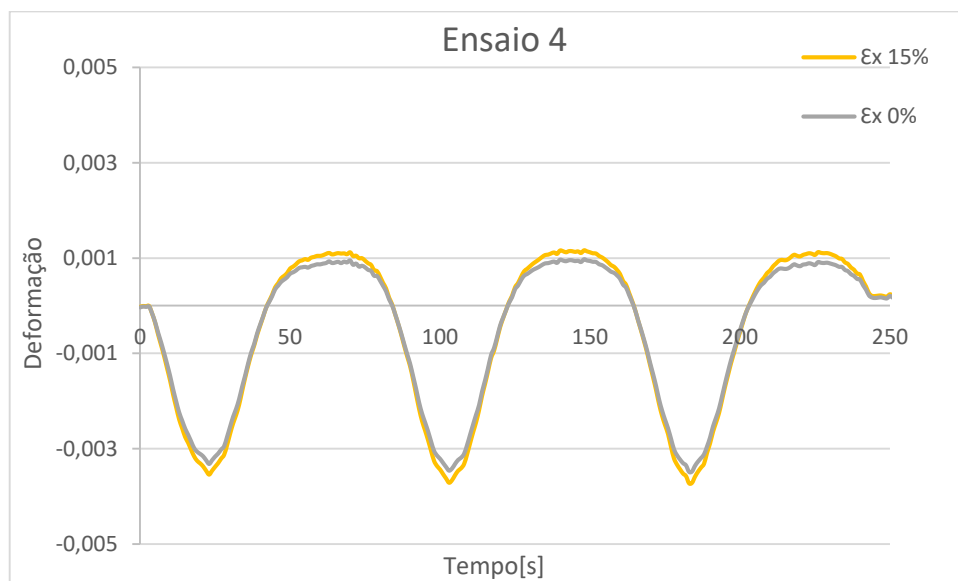


Figura 4.55 – Deformação transversal do provete 7 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

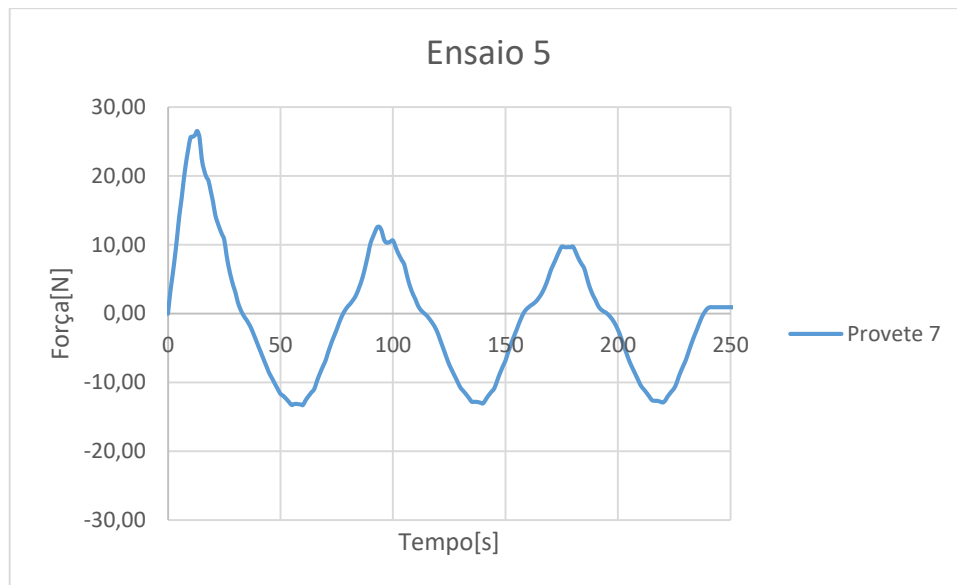


Figura 4.56 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Para o ensaio 5 do provete 7 identifica-se uma diminuição da força a aplicar do primeiro ciclo para o último. Este comportamento acontece pelo descolamento do provete com os acrílicos no início do ensaio, influenciando o comportamento do provete em análise.

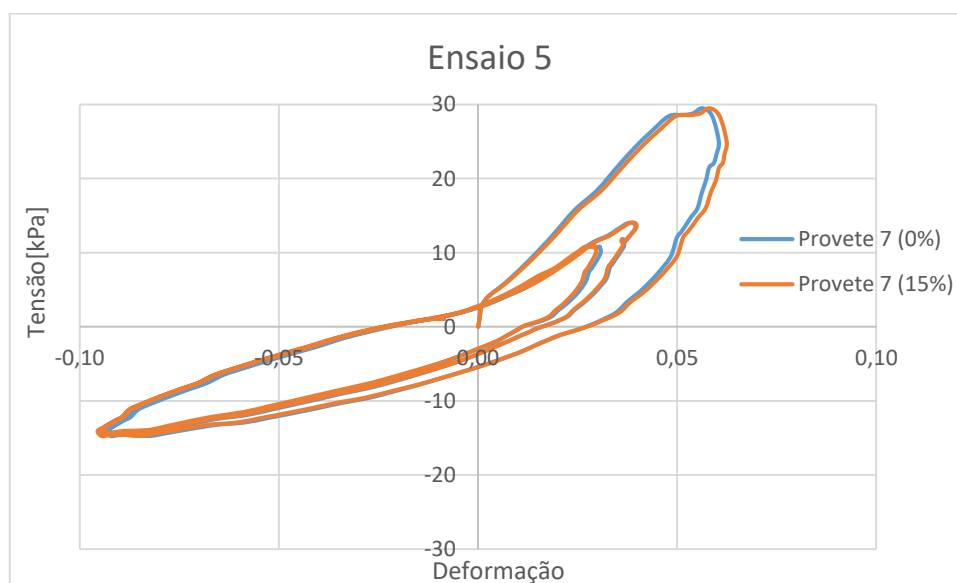


Figura 4.57 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Uma vez mais, com base na figura 4.57, é possível confirmar a ocorrência de uma anomalia no início do ensaio.

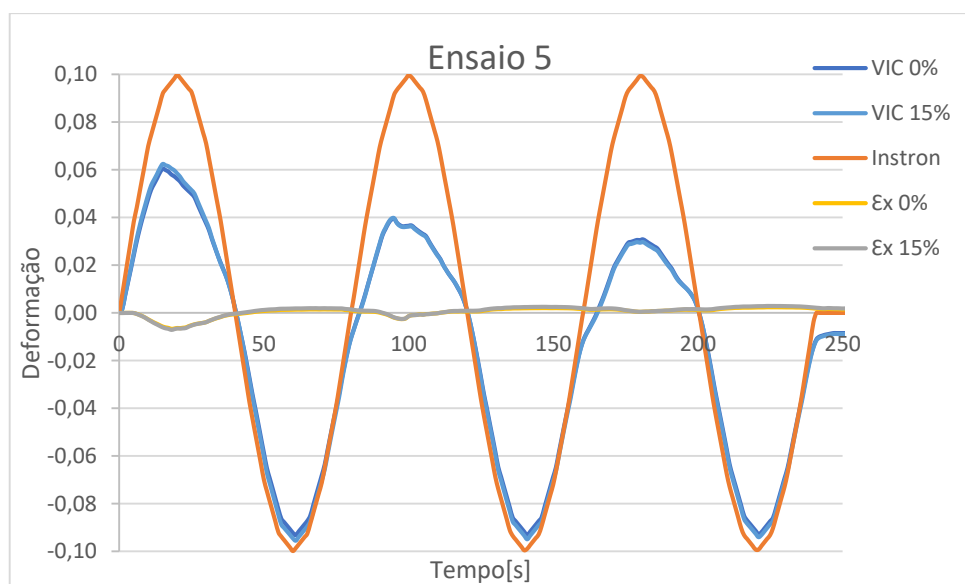


Figura 4.58 – Deformação longitudinal e transversal do provete 7 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Nos resultados provenientes do Instron e do VIC para o provete 7, observa-se uma semelhança nos deslocamentos longitudinais negativos (compressão), verificando-se o oposto para deslocamentos positivos (tração). Este resultado serve para, mais uma vez, comprovar o descolamento do acrílico e do provete.

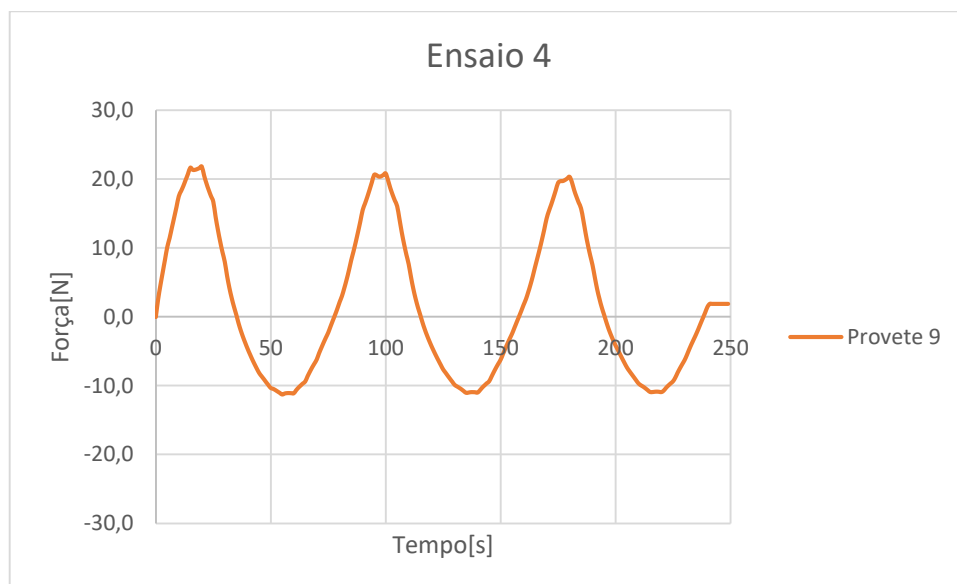


Figura 4.59 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

De igual forma pode-se confirmar que o decorrer do ensaio 4 para o provete 9 foi normal, sendo a força aplicada no decorrer do ensaio constante nos seus valores extremos.

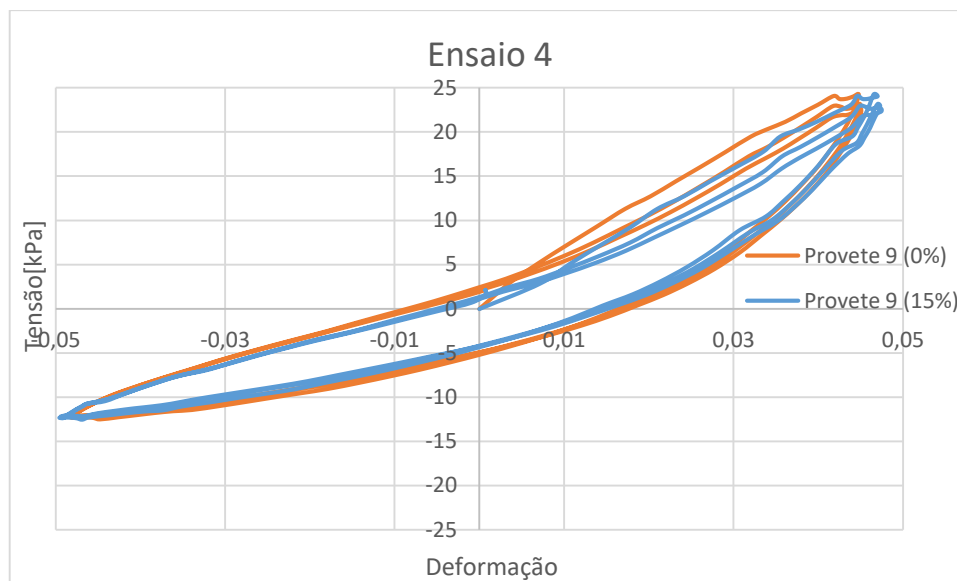


Figura 4.60 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Através da observação da figura 4.60, não se identifica nenhum comportamento anômalo, confirmando-se que o comportamento apresentado pelo provete é o expectável. Registam-se diferenças nos dados para 0 e 15% de eliminação de percentil.

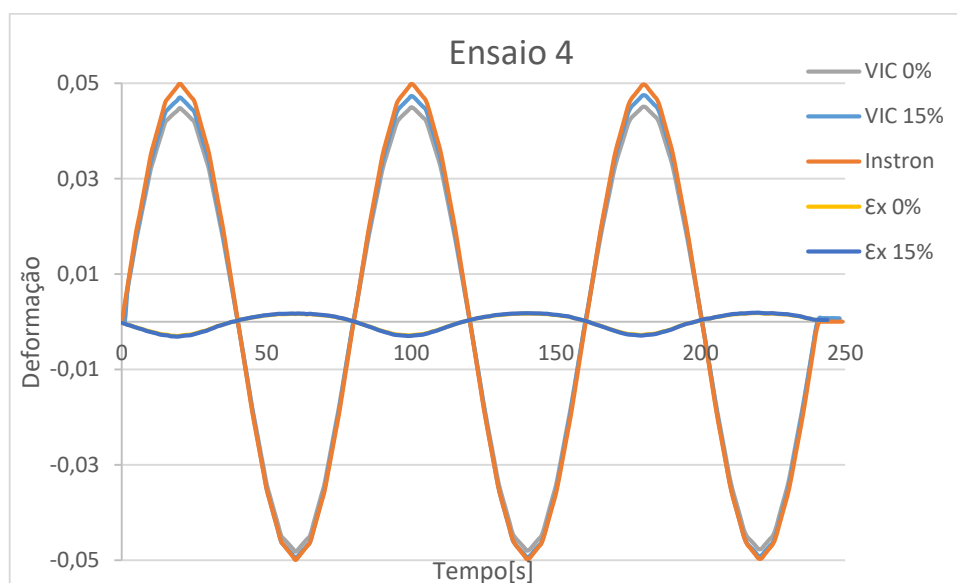


Figura 4.61 – Deformação longitudinal e transversal do provete 9 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Pela observação da figura 4.61 confirma-se que os resultados apresentam-se quase coincidentes na fase de compressão e muito similares na fase de tração, diferindo o valor de VIC 15% e Instron, de aproximadamente 2%. De igual forma é perceptível o correto registo da deformação transversal.

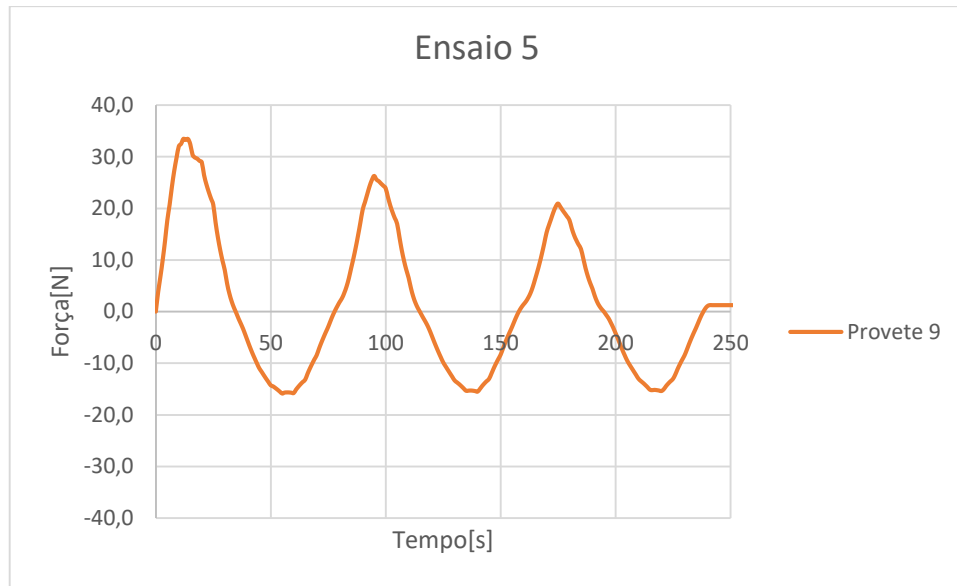


Figura 4.62 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Uma vez mais observa-se, pela figura 4.62, que a aplicação da força é decrescente com o decorrer do ensaio na fase de tração, registando-se um valor constante na fase de compressão.

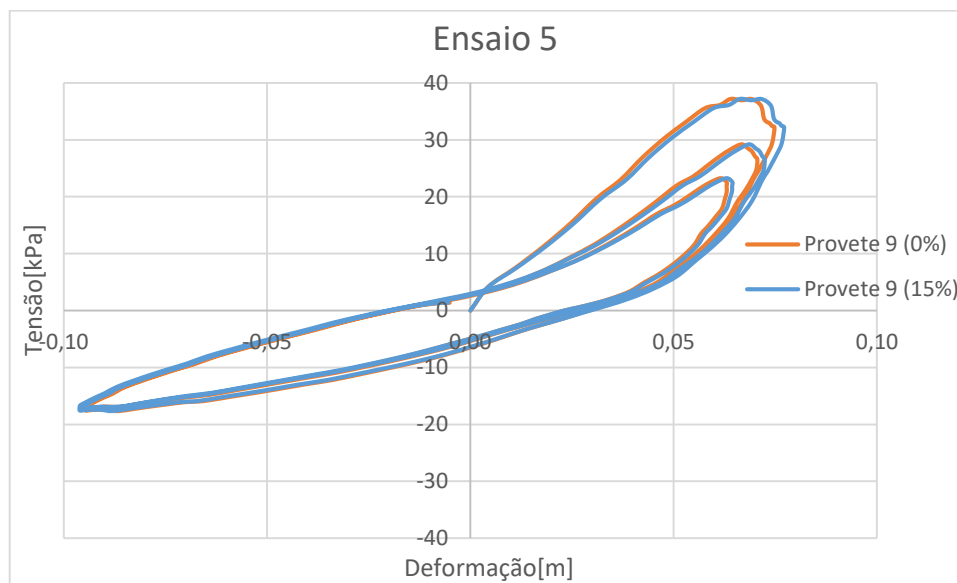


Figura 4.63 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Evidencia-se na figura que a tensão aplicada no provete decresce para os diferentes ciclos do ensaio.

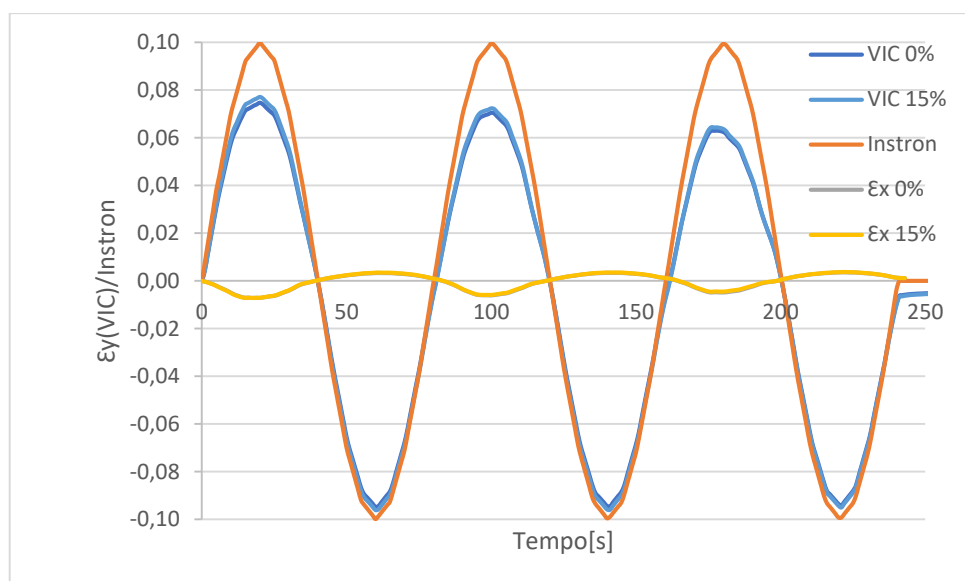


Figura 4.64 – Deformação longitudinal e transversal do provete 9 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Na figura 4.64 observa-se uma semelhança nas deformações negativas (compressão), verificando-se o oposto para as deformações positivas. A diferença registada entre o VIC e o Instron é de 13%.

O registo efetuado para as deformações transversais é claro, sendo possível identificar os diferentes ciclos de ensaio.

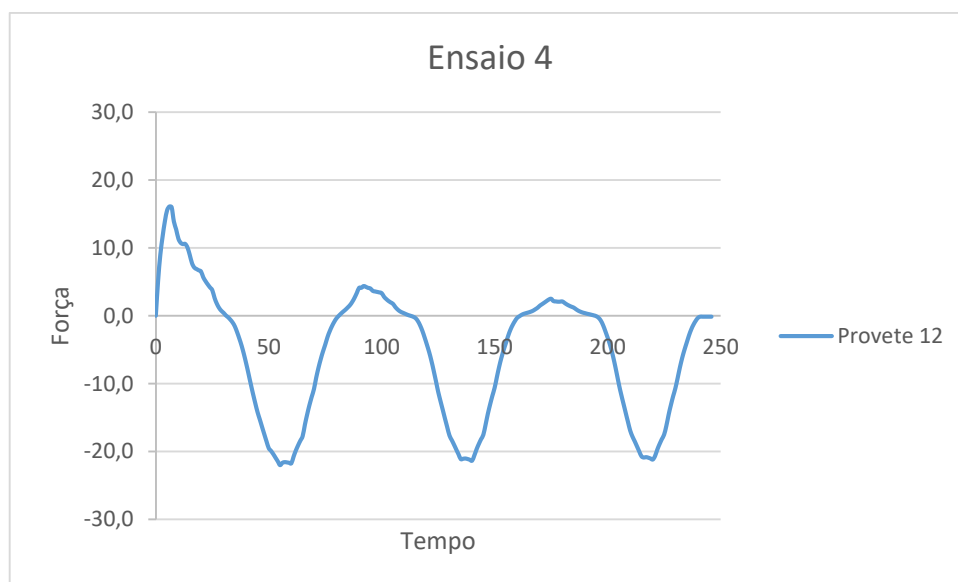


Figura 4.65 – Evolução da força aplicada na duração do ensaio

Ao analisar a figura 4.65, observa-se que o provete 12 não apresenta valores esperados, sendo possível concluir que ocorre o descolamento entre o provete e o acrílico, sob o efeito de forças à tração, no primeiro ciclo. O mesmo não acontece quando está sujeito a forças de compressão, apresentando, neste caso, valores expectáveis.

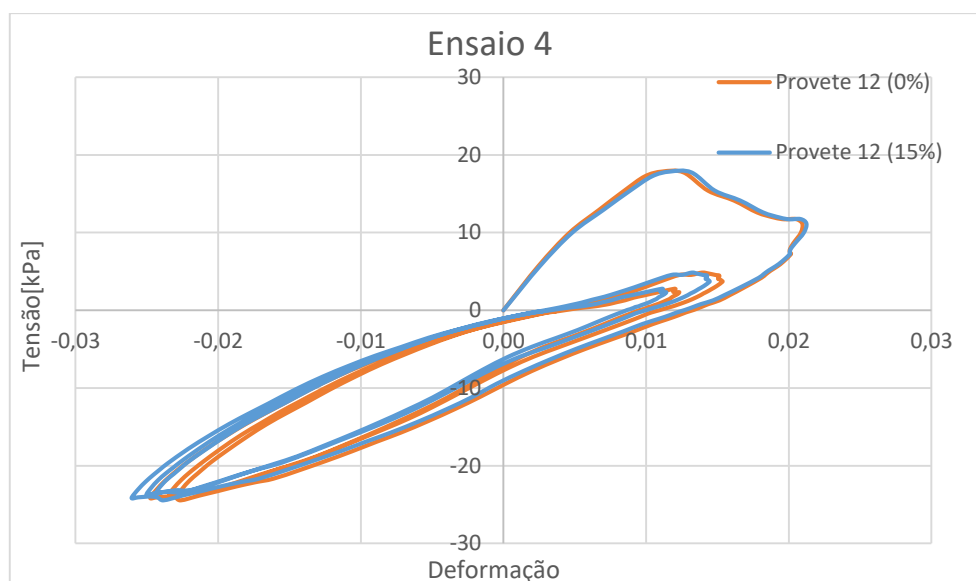


Figura 4.66 – Evolução das deformações com a aplicação da tensão com 0 e 15% de remoção dos valores de percentil

Uma vez mais, na figura 4.66 é possível concluir que o provete 12 no início do ensaio sofreu um descolamento com o acrílico, afetando fortemente o seu comportamento.

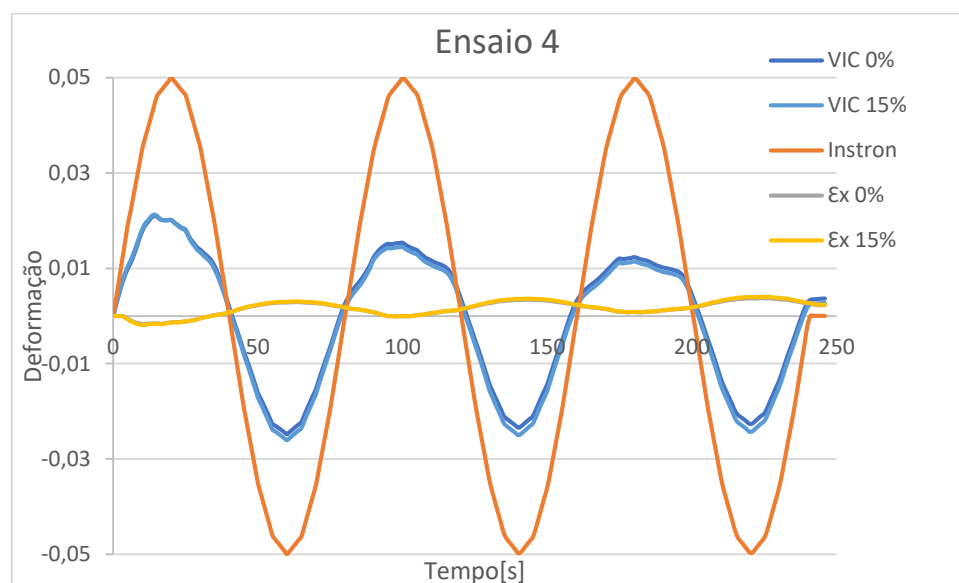


Figura 4.67 – Deformação longitudinal e transversal do provete 12 segundo o Instron e o VIC para 0 e 15%, menos 5 linhas

Através dos dados anteriormente apresentados observa-se que as diferenças entre os dados Instron e o VIC são significativos, sendo o diferencial aproximadamente 62%.

Na observação do comportamento dos provetes aos deslocamentos impostos denota-se o comportamento fora do esperado para o provete 12. Este comportamento é resultado do descolamento da peça de acrílico nas garras da máquina de ensaio.

Capítulo 5

Conclusões

5.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta um conjunto de ensaios experimentais elaborados com o intuito de analisar e caracterizar o polietileno.

Neste capítulo sintetizam-se de forma resumida os resultados obtidos e descritos no capítulo 3. É realizada a comparação entre os resultados nas diferentes orientações e diferentes densidades dos provetes.

Por fim, são sugeridos alguns trabalhos futuros relacionados com o tema estudado.

5.2. RESULTADOS PROVENIENTES DO VIC

É importante referir que o trabalho desenvolvido tem como base o estudo de um material sintético, de superfície irregular, não opaca, de microestrutura irregular, por esta ter na sua constituição bolhas fechadas e não homogêneas à microescala, o que origina deformações não uniformes entre as bolhas, culminando em deformações não lineares. Foi através da comparação entre os resultados do VIC e do Instron que foi possível retirar estas conclusões.

De forma a minimizar as oscilações apresentadas pelo VIC em comparação com os resultados retirados do Instron, foi utilizado um programa no software Matlab que tem como objetivo otimizar os resultados, efetuando uma diminuição da amostra de dados, retirando da análise valores extremos, que, normalmente, estão afastados da “nuvem” dos valores tendenciais. Este

afinamento nos dados é complementado com a possibilidade de se poder eliminar linhas de resultados da tabela de dados. Estas linhas eliminadas são as linhas extremas nos provetes, onde se identifica uma maior quantidade de anomalias devidas às imperfeições provocadas pela colagem do material polietileno e os respectivos acrílicos. Outro motivo que leva à eliminação das linhas das tabelas de valores é o facto de se efetuar o corte nas extremidades, levando à alteração das suas características por se efetuar o corte das bolhas constituintes, fragilizando a sua estrutura.

Foram recolhidos os dados registados pelo VIC e pelo Instron das deformações ocorridas nos diferentes provetes, tendo-se observado e indicado na tabela 5.1 o seu diferencial:

Tabela 5.1 – Dados retirados pelo Instron e VIC das deformações impostas aos provetes

Ensaio	1	1	4	4	5	4	4	5
Proвете	8	10	4	6	6	7	9	9
Diferença entre Instron e VIC	29%	30%	35%	17%	22%	15%	2%	13%

5.3. DEFORMAÇÕES

O estudo efetuado tem como linha condutora a análise dos provetes segundo as suas diferentes orientações, a orientação L e a orientação T. Esta distinção foi tida em conta por o material apresentar uma microestrutura constituída por “bolhas” da forma elíptica, definindo assim duas direcções de ortotropia.

5.3.1 – Deformações segundo a orientação L

Ao analisar os resultados apresentados no capítulo anterior, foi observado que os avanços dos ensaios cíclicos na direcção L contribuem para a progressão da deterioração da microestrutura dos provetes, o que culmina na alteração das suas características internas que, consequentemente, leva à diminuição da sua capacidade resistente. Esta reacção ocorre devido aos provetes apresentarem bolhas ovais na direcção vertical. Assim, entende-se que o provete, por apresentar uma maior rigidez nesta orientação, vai necessitar forças maiores para atingir as deformações pretendidas o que vai contribuir para a ocorrência de um maior número de colapsos por descolagem ou deslizamento nas garras da máquina de ensaio. Na elaboração do presente estudo foi verificado

que os dados registados pelo Instron e pelo VIC diferem numa maior percentagem na fase de tração por ser nesta fase mais explícitos os efeitos da descolagem e deslizamento.

5.3.2 - Deformações segundo a orientação T

Para provetes com orientação T, observa-se que a aplicação de cargas cíclicas não é tão prejudicial, como para os provetes de orientação L. Esta conclusão é possível de ser retirada devido aos provetes com estas orientações apresentarem bolhas ovais segundo uma direção horizontal.

Na análise da reação dos provetes do ponto de vista da densidade, verifica-se que, para um aumento de densidade os provetes tornam-se mais homogêneos. Este comportamento deve-se ao facto de, quanto maior for a densidade dos provetes, maior é a quantidade de “bolhas” na sua constituição, o que leva a uma maior reorganização, tornando o material mais coeso e as bolhas mais esféricas. Esta característica tem repercussão na reação aos esforços sujeitos. Numa análise a provetes de igual tamanho, de igual densidade mas com orientações diferentes, conclui-se que com o aumento da densidade do provete em análise, menor será o diferencial entre a reação da direção L para a direção T. Também se observa um aumento na carga necessária para o provete desenvolver deslocamentos pretendidos com o aumento da densidade.

5.3.3 - Considerações finais

É de facto importante ter em consideração alguns aspectos que, de forma involuntaria, poderão influenciar os dados analisados, nomeadamente a correta fixação das peças de acrílico nas garras da máquina Instron, uma boa colagem entre os provetes de polietileno e as peças de acrílico e a verificação do alinhamento entre o provete e a máquina de ensaio, tanto verticalmente, como na horizontal.

O comportamento mecânico representado nos gráficos do capítulo 4 podia ser descrito usando a definição dos materiais hiperelásticos para grandes deformações com efeitos de viscoelasticidade, cuja formulação é bastante complexa. Ignorando os efeitos não-lineares e, aproximando apenas de acordo com a elasticidade linear, poder-se-ia apresentar um módulo de Young e um número de Poisson característico. No entanto, devido aos resultados apresentarem algumas anomalias e por existir uma diferença considerável entre os resultados retirados do Instron e do VIC, omitiram-se estes valores por não serem representativos.

5.4. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com a investigação desenvolvida, sugerem-se possíveis trabalhos futuros, que visam aprofundar o tema abordado:

- Analisar a deformação transversal deste material através de medidores de deformação.
- Desenvolver um estudo numérico capaz de determinar a influência da densidade do provete nas suas propriedades mecânicas.
- Analisar o comportamento da microestrutura face aos esforços submetidos.
- Desenvolver modelos de Elementos Finitos para a caracterização e optimização de um material de rigidez negativa num intervalo finito de deslocamentos aplicados.
- Realizar um mapa de distribuição de deslocamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jaglinski, T., Kochmann, D., Stone, D., and Lakes, R.S. “*Materials with Viscoelastic Stiffness Greater than Diamond*”, Science, VOL. 315, pp. 620-622, Feb. 2007.
- [2] Lakes, R.S. “*Extreme Damping in Composite Materials with a Negative Stiffness Phase*”, Phys. Rev. Lett., Vol. 86(13), pp. 2897-2900, 2001.
- [3] Heczko, J., Dimitrovová, Z., Rodrigues, H.C. “*Negative Stiffness Materials for Vibration Damping: a Material Realization of a Nonlinear Bistable Element*”, International Journal of Innovations in Materials Science and Engineering (IMSE), VOL. 1, NO. 2.
- [4] Lakes, R.S. “*Extreme Damping in Compliant Composites Materials with a Negative - Stiffness Phase*”, Phil. Mag. Lett., Vol. 81(2), pp. 95-100, 2001.
- [5] Kalathur, H., Lakes, R.S. “*Column Dampers with Negative Stiffness: High Damping at Small Amplitude*”, Smart Mater. Struct., VOL. 22(8), 084013-21, 2013.
- [6] <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/>
- [7] James, R. D., 1979, Arch. Rational Mech. Anal., 72, 99–140.
- [8] Ball, J. M., 1996, Nonlinear Mathematics and its Applications, edited by P. J. Aston (Cambridge University Press), pp. 93–119.
- [9] Knowles, J. K., and Sternberg, E., 1978, J. Elasticity, 8, 329–379.
- [10] Lakes, R.S. and Drugan, W. J. 2000 (to be published)
- [11] Hrinda, A., G., “*Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures*”, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23831
- [12] Cismasiu, C., “*Dinâmica de Sólidos*”, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, DEC/FCT/UNL, 2005-2009
- [13] Heczko, J., Dimitrovová, Z., Rodrigues H.C. 2013. Composite material with negative stiffness inclusion for vibration damping: The effect of a nonlinear bistable element. In Z. Dimitrovová, JR. de Almeida & R. Gonçalves (eds) *Proc. 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)*, Lisbon, Portugal, 9-12 September.
- [14] <https://www.datapointlabs.com>
- [16] <https://www.alliedvision.com>
- [16] www.hedler.com/dx15-e.html
- [17] <https://www.mathworks.com/>

